EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

"I PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

MODELO SIMPLIFICADO DE UN SISTEMA HIDROTERMAL PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UN EMULADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Que para obtener el Grado de
Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

Presenta
M.C.I. Brenda Lizeth Reyes García
D09071201
No. CVU 732632

Director de Tesis
Dr. Pedro Martín García Vite
No. CVU 227310

Co-director de Tesis
Dra. Ana Lidia Martínez Salazar
No. CVU 277554

Cd. Madero, Tamaulipas junio 2025

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, 09/Junio/2025

Oficio No. U10.029/2025
ASUNTO: Autorización de Impresión

C. BRENDA LIZETH REYES GARCÍA
No. DE CONTROL D09071201
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SECRETARIO:	DRA.	ANA LIDIA MARTÍNEZ SALAZAR
VOCAL 1:	DR.	NELSON RANGEL VALDEZ
VOCAL 2:	DR.	LUCIANO AGUILERA VÁZQUEZ
VOCAL 3:	DRA.	NOHRA VIOLETA GALLARDO RIVAS

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"MODELO SIMPLIFICADO DE UN SISTEMA HIDROTERMAL PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UN EMULADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA "

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Por Mi Patria y Por Mi Bien" ®

RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

EDUCACIÓN
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
RCG/NRV/jan

2025 Año de La Mujer Indígena

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx

"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

100% LIBRE DE PLÁSTICO DE UN SOLO USO

Dedicatoria

A mis hijos, mi inspiración. A mi esposo, mi compañero en cada paso que doy. A mis padres, mi ejemplo a seguir.

Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios por las bendiciones recibidas y por siempre mostrarme el camino.

A mi directo de tesis el Dr. Pedro Martín García Vite, por haberme guiado en este proyecto, por compartir su experiencia y conocimiento, por todas las retroalimentaciones y por siempre apoyarme. Su experiencia, claridad conceptual y constante disposición para compartir conocimientos fueron fundamentales para la consolidación de este trabajo. Más allá de su rol como asesor, agradezco su confianza en mis capacidades y el impulso que me brindó para superar cada desafío. Esta tesis no habría sido posible sin su acompañamiento y orientación.

A mi co-directora la Dra. Ana Lidia Martínez Salazar, por su valioso acompañamiento y por todo el apoyo brindado. Su experiencia complementó de manera significativa el desarrollo de esta investigación y sobre todo, por su impacto en mi formación profesional.

A mi tutor el Dr. Nelson Rangel Valdez, su orientación académica, sus observaciones oportunas y su disposición para resolver dudas fueron fundamentales para mantener el rumbo del trabajo. Su apoyo no solo fortaleció el contenido de esta investigación, sino también mi formación profesional.

A mi comité tutorial, conformado por Dr. Luciano Aguilera Vázquez, y la Dra. Nohra Violeta Gallardo Rivas. Por sus valiosos comentarios, por su acompañamiento cercano y constante durante el desarrollo de esta tesis.

A mi hijos Víctor Jesús Castillo Reyes y Catalina Castillo Reyes por ser mi motivo de alegría e inspiración más grande de cada paso que doy, los amo con todo mi ser. A mi esposo Jesús Nathanael Castillo Guzmán, por todo el apoyo, amor y comprensión. Mis logros siempre serán suyos también. A mi madre Brenda García Rodríguez por apoyarme siempre en todas mis metas y sueños. A mi padre Victoriano Reyes Méndez por apoyarme siempre, por motivarme a seguir adelante en cada paso, por enseñarme a luchar para conseguir mis objetivos y cumplir mis sueños. A mis hermanos Héctor y Jafet, por su apoyo incodicional y por siempre ser mis cómplices. A mi suegra Elvira Castillo Guzmán, por todo el apoyo brindado.

A mis amigos y compañeros del prosgrado en Ciencias de la Ingeniería: Andrea, Diana, Pedraza, Rebullosa, Perales, Aracely y Zumaya por todos los momentos compartidos, sus consejos y apoyo.

Agradecimientos especiales:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado a través de la beca 732632.

Al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Modelo simplificado de un sistema hidrotermal para su implementación en un emulador de energía geotérmica

Brenda Lizeth Reyes García

Resumen

El presente trabajo de tesis se centra en el desarrollo, implementación y análisis de un modelo dinámico de un sistema geotérmico conceptualizado como un tanque, con el objetivo de estudiar su comportamiento térmico e hidráulico bajo diferentes condiciones operativas. Este tipo de modelado es fundamental para comprender la evolución de variables clave como la presión, el flujo de producción y la recarga en reservorios geotérmicos, especialmente aquellos de baja y media entalpía.

Para ello, se empleó la plataforma Simulink de MATLAB, que permite representar sistemas físicos mediante bloques funcionales interconectados. El modelo propuesto se basa en un enfoque de bloques, donde el reservorio se conceptualiza como un volumen cerrado que intercambia masa y energía con su entorno. Se consideraron entradas como la recarga natural y la inyección artificial, así como salidas asociadas a la producción de fluido. Las ecuaciones que rigen el sistema fueron formuladas a partir de principios de conservación de masa y energía, y resueltas mediante integración numérica.

Una de las principales ventajas del enfoque utilizado es su capacidad para simular el comportamiento transitorio del sistema, es decir, cómo responde el reservorio ante perturbaciones como cambios en la tasa de extracción o en las condiciones de recarga. Los resultados obtenidos muestran que el sistema presenta una respuesta rápida en términos de presión, seguida de una estabilización progresiva, lo cual es indicativo de un comportamiento físico coherente con lo esperado en reservorios reales.

Además, se generaron representaciones gráficas del modelo físico y matemático, así como simu-

laciones visuales que permiten interpretar de forma clara la dinámica del sistema. Estas herramientas no solo facilitan la validación del modelo, sino que también constituyen un recurso didáctico valioso para la enseñanza y la investigación en ingeniería geotérmica.

En términos de contribución, este proyecto ofrece una metodología replicable para el análisis de sistemas geotérmicos mediante herramientas de simulación accesibles y versátiles. Asimismo, proporciona una base para futuras investigaciones orientadas a la optimización de la explotación geotérmica, la evaluación de la sostenibilidad de los reservorios y el diseño de estrategias de manejo eficiente del recurso.

Simplified model of a hydrothermal system for implementation in a geothermal energy emulator

Brenda Lizeth Reyes García

Abstract

This thesis focuses on the development, implementation, and analysis of a dynamic model of a geothermal system conceptualized as a tank, with the aim of studying its thermal and hydraulic behavior under various operating conditions. This type of modeling is essential for understanding the evolution of key variables such as pressure, production flow, and recharge in geothermal reservoirs, particularly those of low and medium enthalpy.

To achieve this, the Simulink platform in MATLAB was used, allowing physical systems to be represented through interconnected functional blocks. The proposed model is based on a block oriented approach, where the reservoir is conceptualized as a closed volume that exchanges mass and energy with its surroundings. Inputs such as natural recharge and artificial injection were considered, as well as outputs associated with fluid production. The governing equations were formulated based on mass and energy conservation principles and solved numerically through integration.

One of the main advantages of the chosen approach is its ability to simulate the system's transient behavior that is, how the reservoir responds to disturbances such as changes in extraction rates or recharge conditions. The results show that the system exhibits a rapid pressure response followed by progressive stabilization, which is consistent with the expected behavior of real reservoirs.

Additionally, graphical representations of the physical and mathematical model were generated, along with visual simulations that clearly illustrate the system's dynamics. These tools not only

support model validation but also serve as valuable educational resources for teaching and research in geothermal engineering.

In terms of contributions, this project offers a replicable methodology for analyzing geothermal systems using accessible and versatile simulation tools. It also provides a foundation for future research aimed at optimizing geothermal exploitation, assessing reservoir sustainability, and designing efficient resource management strategies.

Índice general

Resumen VII

Abstract II

Índice de Tablas VI

Índice de Figuras VII

1 Introducción **1**

1.1 Planteamiento del problema 3

1.2 Objetivos 6

1.2.1 Objetivos específicos 6

1.3 Justificación del estudio 6

1.4 Alcances y delimitaciones 8

1.4.1 Alcances 8

1.4.2 Limitaciones 8

1.5 Hipótesis 9

1.6 Organización de la tesis 9

2 Antecedentes **10**

2.1 Energía geotérmica 12

2.2 Tipos de energía geotérmica 13

2.2.1 Evaluación de recurso geotérmico 15

2.3 Sistemas geotérmicos de baja-media entalpía 16

2.4 Modelado matemático de yacimientos geotérmicos 17

2.4.1 Modelos de punto único 18
2.4.2 Modelo histórico 19
2.5 Principios de conservación aplicados al modelado (masa, energía, momento) 23
2.6 Energía geotérmica en las microrredes 24
2.7 Energía geotérmica en México 26

3 Metodología **30**
3.1 Analogía del sistema de tanques a un circuito eléctrico 32
3.1.1 Circuito eléctrico equivalente del modelo simple de un tanque 33
3.1.2 Circuito eléctrico equivalente del modelo de dos tanques 41

4 Análisis de resultados **44**
4.0.1 Simulación para el modelo de un tanque 46

5 Conclusiones Generales y Trabajos Futuros **50**
5.1 Conclusiones Generales 50
5.2 Contribuciones 51
5.3 Recomendaciones para trabajos futuros 51
5.4 Actividades realizadas 51
5.5 Publicaciones 52

Bibliografía **52**

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Clasificación de la energía geotérmica. 13

Tabla 2.2 Descripción de los sistemas geotérmicos. 14

Tabla 2.3 Descripción de los principales modelos de punto único. 19

Tabla 2.4 Descripción de los principales modelos históricos. 20

Tabla 2.5 Potencial de Generación eléctrica con energías limpias en México. Fuente: INERE [1]. 27

Tabla 3.1 Analogía de variables del sistema geotérmico al circuto eléctrico. 34

Tabla 3.2 Elementos del circuito con su ecuación y sistema de unidades. 41

Índice de Figuras

Figura 2.1 Estructura de un sistema geotérmico. 12

Figura 2.2 Estructura de un sistema geotérmico [2]. 21

Figura 2.3 Capacidad geotérmica instalada en 2019 a nivel mundial [3]. 26

Figura 2.4 Capacidad efectiva instalada y generación bruta de centrales geotérmicas, 2005 -2015 (MW, GWh) [1]. 28

Figura 2.5 Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de la tecnología geotérmica 2016-2030 (MG, GWh) [1]. 28

Figura 2.6 Provincias geotérmicas y mapa de flujo de calor en México [1]. 29

Figura 2.7 Provincias fisiográficas y actividad volcánica reciente en México [1] 29

Figura 3.1 Circuito eléctrico del modelo de un tanque 34

Figura 3.2 Configuración de parámetros agrupados en el modelo simple. 35

Figura 3.3 Esquema de la Ley de Kirchhoff y balance de masas an el nodo A. 42

Figura 3.4 Ecuaciones de cambio en el Voltaje y cambio en la Presión. 42

Figura 3.5 Modelo de dos tanques con variables de balance masa y variables eléctricas . 43

Figura 3.6 Circuito del modelo de tanques de segundo orden 43

Figura 4.1 Simulink para el modelo de un tanque. 47

Figura 4.2 Gráfica de presión con respecto al tiempo. 48

CAPÍTULO 1

Introducción

La energía geotérmica se posiciona como una solución clave para enfrentar los desafíos energéticos y ambientales planteados por la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ODS). En un contexto global qdonde la transición hacia fuentes de energía limpias y renovables es una necesidad imperativa, esta forma de energía destaca por su capacidad de ofrecer un suministro continuo, eficiente y con baja huella ambiental. Su aprovechamiento contribuye directamente a metas como el acceso universal a energía asequible y no contaminante, la mitigación del cambio climático y el desarrollo de comunidades resilientes [4].

El uso intensivo de fuentes no renovables ha generado impactos ambientales significativos, como el calentamiento global, el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero y la degradación de los ecosistemas. Frente a ello, el crecimiento sostenido de la demanda energética, impulsado por la urbanización y el desarrollo económico, ha incentivado la búsqueda de alternativas más sostenibles. Entre estas, la energía geotérmica se ha consolidado como una opción viable y confiable, con ventajas como su disponibilidad continua, eficiencia térmica y bajo impacto ecológico [5]. Por ello, la interacción

con otros sistemas de generación y con el sistema eléctrico convencional es una solución plausible para la integración de microrredes.

México, en particular, es un referente en América Latina en el desarrollo de esta tecnología. Se estima que cuenta con un potencial geotérmico de hasta 13.4 GW, considerando reservas probadas, probables y posibles [6]. A pesar de ello, su participación en los proyectos energética nacionales sigue siendo limitada, lo que refleja la necesidad de desarrollar nuevas metodologías que optimicen su aprovechamiento y faciliten su integración en sistemas energéticos modernos, como las microrredes.

La integración de diversas fuentes renovables mediante esquemas de generación distribuida ha dado lugar al desarrollo de microrredes híbridas, donde conviven tecnologías intermitentes como la solar y eólica con otras de base, como la geotérmica. Estos sistemas permiten mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico, reducir costos operativos y avanzar hacia modelos más sostenibles. Para su diseño y evaluación, la simulación de componentes individuales y su interacción dentro del sistema es un paso esencial.

En este sentido, los modelos matemáticos simplificados representan herramientas fundamentales para analizar el comportamiento de yacimientos geotérmicos, particularmente aquellos de tipo hidrotermal y media entalpía, los cuales poseen un gran potencial en regiones como México. Al enfocarse en el balance de masa, estos modelos permiten caracterizar el flujo del recurso y predecir su respuesta ante distintos escenarios de operación, facilitando su incorporación en plataformas de simulación de microrredes.

Entre los mecanismos de evaluación, los modelos matemáticos simplificados son una herramienta clave para simular el comportamiento de los yacimientos geotérmicos y su integración en microrredes con diversas fuentes de energía renovable. En un paso posterior a la simulación numérica, un emulador permite una interacción más cercana con las variables manipuladas en los sistemas reales. En este sentido, el desarrollo de un emulador geotérmico basado en sistemas electrónicos permite evaluar el desempeño de estos sistemas en un entorno controlado, facilitando su análisis y optimización antes de

su implementación en el campo [7].

Por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un modelo matemático simplificado de un yacimiento geotérmico de tipo hidrotermal de media entalpía para su implementación en un emulador geotérmico. Este modelo servirá como una herramienta clave en la simulación de microrredes, permitiendo evaluar la interacción de la energía geotérmica con otras fuentes renovables y optimizar su aprovechamiento en sistemas energéticos sostenibles [8].

1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años, la Red Eléctrica Nacional (REN) ha mostrado signos de insuficiencia para satisfacer la creciente demanda energética de los consumidores. Este aumento en el consumo de electricidad se debe, en gran parte, a factores como el crecimiento poblacional, la urbanización y la digitalización de diversos sectores industriales. Se prevé que esta demanda se intensifique aún más con la incorporación de vehículos eléctricos, lo que generará una presión adicional sobre la infraestructura existente [9].

En este contexto, la integración de fuentes de energía renovable se vuelve crucial para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Una estrategia clave para lograrlo es el desarrollo de microrredes, las cuales han ganado relevancia en los últimos años debido a su capacidad para incorporar energías renovables de manera eficiente dentro de la infraestructura de la REN.

Para evaluar el desempeño de una microrred con fuentes de energía renovable, es fundamental contar con herramientas de simulación que permitan analizar su comportamiento en distintos escenarios. En particular, la incorporación de tecnologías como paneles fotovoltaicos, celdas de combustible de intercambio protónico (PEMFC) y biomasa, en conjunto con la energía geotérmica, ofrece una alternativa viable para garantizar un suministro energético estable y confiable. Mientras que fuentes como la solar y la basada en hidrógeno presentan una alta variabilidad en función de condiciones

ambientales no controlables, la energía geotérmica se distingue por su estabilidad operativa.

La relevancia del estudio de la interacción entre la generación geotérmica y otras fuentes de energía radica en su potencial para optimizar el diseño y la operación de las microrredes. La generación geotérmica, aunque menos variable en comparación con la eólica o la fotovoltaica, está influenciada por factores geológicos complejos. Parámetros como la densidad, porosidad y temperatura del subsuelo determinan su capacidad de generación y estabilidad a lo largo del tiempo. Por ello, es fundamental desarrollar herramientas que permitan simular con precisión el comportamiento de los sistemas geotérmicos dentro de una microrred.

En este sentido, los emuladores geotérmicos desempeñan un papel crucial, ya que permiten replicar las condiciones geológicas de un yacimiento y analizar su desempeño en condiciones operativas reales. Estos emuladores pueden modelar parámetros esenciales como la permeabilidad, la conductividad térmica y la distribución de fracturas, proporcionando información clave para optimizar la integración de la energía geotérmica en sistemas eléctricos descentralizados.

La integración de emuladores geotérmicos en el diseño y análisis de microrredes no solo mejora la eficiencia operativa de estos sistemas, sino que también facilita la toma de decisiones en la gestión de la variabilidad inherente a las fuentes renovables. Al combinar la estabilidad de la energía geotérmica con la flexibilidad de las microrredes, es posible maximizar el uso de energías limpias, optimizar la distribución energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales. La simulación precisa de las condiciones geotérmicas mediante emuladores se convierte, por tanto, en una herramienta indispensable para avanzar hacia sistemas de energía más resilientes y sostenibles.

No obstante, el diseño de emuladores geotérmicos enfrenta importantes desafíos, entre los cuales la variabilidad geológica es uno de los más significativos. La eficacia de un emulador depende de su capacidad para representar fielmente las condiciones específicas de distintos yacimientos geotérmicos, lo que implica considerar diferencias en la composición del subsuelo, la presencia de capas con propiedades termofísicas distintas y la distribución irregular de fracturas y fallas geológicas. Estas

variaciones pueden afectar significativamente la precisión de los modelos y, en consecuencia, la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Para abordar este desafío, es necesario implementar enfoques innovadores en el desarrollo de emuladores geotérmicos, tales como la integración de datos geológicos detallados en los modelos y el uso de algoritmos avanzados que permitan adaptarse a la variabilidad geológica. Mejorar la precisión y confiabilidad de estos emuladores contribuirá significativamente al diseño y optimización de proyectos geotérmicos, facilitando una transición adecuada hacia un sistema energético basado en fuentes renovables.

Si bien existen modelos matemáticos capaces de simular con alta fidelidad el comportamiento de sistemas geotérmicos, la incorporación de la energía geotérmica en microrredes requiere el desarrollo de un emulador que permita su implementación en una etapa temprana del diseño. Actualmente, no se dispone de un emulador que facilite la integración de la energía geotérmica en microrredes, lo que resalta la necesidad de desarrollar modelos que incluyan componentes y variables eléctricas y electrónicas. Un emulador geotérmico de este tipo permitiría una mejor interacción con las variables que rigen el comportamiento de un campo geotérmico y, en consecuencia, una implementación más efectiva de esta fuente de energía en redes eléctricas descentralizadas.

1.2. Objetivos

Desarrollar un modelo matemático simplificado que represente el comportamiento de un yacimiento geotérmico hidrotermal de media entalpía, con el fin de integrarlo en la simulación de microrredes híbridas mediante herramientas computacionales.

1.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar los parámetros físicos, térmicos y de flujo que definen el comportamiento de un yacimiento geotérmico hidrotermal de media entalpía.
- Identificar las variables más significativas a utilizarse en el modelo simplificado de energía geotérmica.
- Desarrollar un sistema eléctrico análogo que permita la emular el comportamiento del sistema geotérmico de tipo hidrotermal.
- Validar los modelos matemáticos existentes para medir la efectividad mediante un software especializado.
- Desarrollar el modelo matemático que describa el flujo de fluido en el yacimiento.

1.3. Justificación del estudio

México es uno de los países pioneros en América Latina en el aprovechamiento del recurso geotérmico. Sin embargo, a pesar de su gran potencial, su participación en la matriz energética nacional sigue siendo reducida. En 2016, la generación de energía eléctrica a partir de fuentes geotérmicas representó únicamente el 1.9 porciento del total nacional, equivalente a 6,148 GWh de un total de 319,364 GWh generados por fuentes convencionales y no convencionales combinadas [10]. Esta cifra

contrasta con el potencial estimado del país, que asciende a 13,400 GWh, considerando reservas probadas, probables y posibles [11]. Esto significa que México se encuentra aproximadamente 45.9 porciento por debajo de su capacidad de aprovechamiento, debido en gran parte a factores técnicos, económicos y de gestión.

Además, el desarrollo comercial de esta fuente de energía se ha visto limitado a los yacimientos hidrotermales convencionales, cuya explotación requiere inversiones elevadas y periodos de recuperación prolongados. Sin embargo, el territorio mexicano alberga todos los tipos de sistemas geotérmicos conocidos, desde reservorios someros (entre 500 y 3,000 metros) hasta recursos profundos (más de 3,000 metros), lo cual resalta su alto potencial estratégico en la transición energética.

En este contexto, la integración de la energía geotérmica en microrredes eléctricas representa una vía prometedora para impulsar su aprovechamiento en esquemas de generación distribuida. Particularmente, en el marco de la transición hacia redes inteligentes, se requiere el desarrollo y validación de modelos que representen el comportamiento dinámico de diversas fuentes de generación renovable, incluidas aquellas de base como lo es la geotérmica. Sin embargo, esta validación, se ve limitada por la falta de herramientas accesibles que permitan simular o validar su funcionamiento de forma controlada y segura. Los emuladores y simuladores se han convertido en herramientas clave para el diseño y prueba. En la investigación aplicada, posibilitan el desarrollo y validación de estrategias de control, conversión y gestión de energía.

Por tanto, el desarrollo de un modelo matemático simplificado de un yacimiento geotérmico hidrotermal de media entalpía, que pueda ser integrado en simulaciones de microrredes híbridas, representa una contribución significativa para el desarrollo energético. Este tipo de herramientas facilitará el análisis funcional del recurso geotérmico en esquemas multifuente.

1.4. Alcances y delimitaciones

1.4.1. Alcances

A continuación se presentan los alcances del presente proyecto:

- Análisis y simulación del modelo matemático simplificado del sistema geotérmico centrados en la variable de presión del sistema.
- Descripción del modelado matemático del sistema geotérmica mediante sistema eléctrico análogo.
- Modelado matemático de un sistema sistema geotérmico con varios tanques.
- El modelo se centra exclusivamente en la formulación del balance de masa para representar el comportamiento dinámico de un yacimiento geotérmico de tipo hidrotermal de media entalpía.
- Se modelará el flujo de fluido en una geometría conceptual de tanques, idealizada, con parámetros representativos del sistema hidrotermal.
- El modelo será implementado en la plataforma MatLab para realizar simulaciones bajo condiciones específicas de operación.

1.4.2. Limitaciones

A continuación se presentan las delimitaciones del presente proyecto:

- El modelo no considera variaciones de temperatura, gradientes térmicos, ni procesos de conducción o convección de calor, por lo que no representa fenómenos termodinámicos.
- Se asume que el fluido geotérmico mantiene densidad y viscosidad constantes, sin incluir efectos de compresibilidad o cambios de fase.

- La validación se basará en comparación con resultados teóricos o reportes bibliográficos; no se contempla validación experimental ni uso de datos de campo reales.
- El modelo no incorpora algoritmos de control, regulación o interacción con convertidores de energía.

1.5. Hipótesis

Un modelo matemático basado únicamente en el balance de masa puede representar de forma suficiente el flujo del recurso geotérmico para analizar su comportamiento dentro de una microrred híbrida simulada.

1.6. Organización de la tesis

La estructura de esta tesis está organizada en cinco secciones principales. En la Introducción, se plantea el contexto del problema, los objetivos de la investigación, la justificación, la hipótesis y los alcances y limitaciones del estudio. La sección de Antecedentes presenta una revisión teórica y técnica sobre los fundamentos de la energía geotérmica, los sistemas hidrotermales de media entalpía, el balance de masa aplicado al modelado de yacimientos, y el concepto de microrredes como sistemas energéticos distribuidos. En la Metodología se describe el desarrollo del modelo matemático simplificado basado en el balance de masa, así como su implementación en un entorno de simulación computacional y las condiciones bajo las cuales se realizaron los análisis. La sección de Análisis y resultados muestra los escenarios evaluados, la integración del modelo en una microrred híbrida y la interpretación de los resultados obtenidos. Finalmente, en Trabajos futuros, se proponen líneas de investigación orientadas al perfeccionamiento del modelo, su validación experimental mediante emuladores físicos y su aplicación en diseño energético.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

La creciente necesidad de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles ha impulsado el desarrollo y la integración de tecnologías basadas en energías renovables de varios tipos. En este contexto, la energía geotérmica ha adquirido relevancia como una fuente limpia, continua y confiable, particularmente en regiones con alto potencial geotérmico, como es el caso de México. Sin embargo, su incorporación en esquemas de generación distribuida, como las microrredes, aún enfrenta diversos retos técnicos, económicos y de modelado en cuestión.

Los sistemas geotérmicos de tipo hidrotermal, especialmente aquellos de media entalpía, representan una alternativa viable para su aprovechamiento a pequeña y mediana escala. No obstante, la caracterización y análisis de estos sistemas requiere de modelos que permitan representar de manera adecuada su comportamiento dinámico bajo diferentes condiciones de operación. Entre los enfoques más utilizados se encuentran los modelos matemáticos que, a través de la aplicación de principios de conservación, facilitan el estudio de variables como el flujo de masa, presión y volumen del reservorio.

Por otro lado, las microrredes han emergido como una solución tecnológica para integrar

múltiples fuentes renovables en sistemas eléctricos locales, con capacidad de operar de forma autónoma o conectadas a la red eléctrica nacional principal. En estas configuraciones, es necesario contar con modelos representativos de cada fuente energética que permitan simular su interacción, evaluar la estabilidad del sistema y diseñar estrategias de control eficientes.

En este capítulo se presentan los antecedentes conceptuales y técnicos que fundamentan el desarrollo del presente trabajo. Se abordan los principios de la energía geotérmica, la clasificación de los sistemas hidrotermales, el modelado matemático de yacimientos, así como el papel de la geotermia en las microrredes. Asimismo, se incluye una revisión del estado del arte sobre modelos simplificados basados en el balance de masa y su implementación en plataformas de simulación, con el objetivo de identificar las principales contribuciones existentes y las brechas que motivan esta investigación.

2.1. Energía geotérmica

En el interior de la tierra se llevan acabo procesos de flujo de calor, que van desde el interior de la tierra hasta los estratos superiores de la corteza terrestre,este flujo de calor produce cambios de temperaturas a distintas profundidades, dicha variación se conoce como gradiente geotérmico. El cual, pueden variar desde valores normales (alrededor de ($\geq 30^\circ$ C) por kilómetro) hasta unos ($\geq 200^\circ$ C) por kilómetro, en los bordes de las placas tectónicas, donde el deslizamiento de de las placas tectónicas favorece el ascenso del magma. Si bien, la energía térmica se almacena principalmente en las rocas que componen los diferentes estratos del subsuelo, se requiere de un fluido de trabajo para que el calor difuso pueda ser recolectado para posteriormente ser transferido y concentrado, y de esta forma se crean los reservorios geotérmicos [12]. En la Figura 2.1, se presenta de forma general la estructura de un sistema geotérmico considerando un sistema de generación de energía eléctrica, ya que se presenta con la respectiva planta de aprovechamiento.

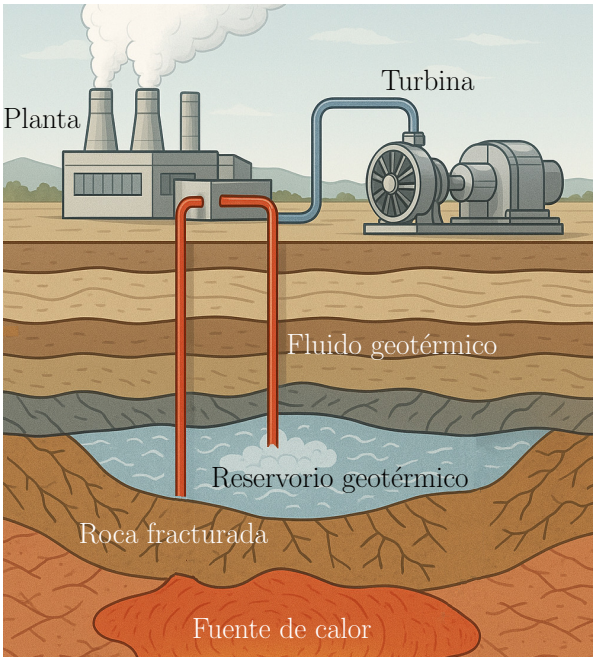

Figura 2.1: *Estructura de un sistema geotérmico.*

2.2. Tipos de energía geotérmica

En la bibliografía se presentan diversas clasificaciones de la energía geotérmica, entre las cuales se encuentra una en función de la temperatura del sistema. Dicha temperatura es uno de los parámetros más relevante del sistema geotérmico, ya que de esta dependerá la utilización de la energía generada por el recurso. En la Tabla 2.1 se presenta la clasificación de los recursos geotérmicos en función de la temperatura y se menciona la utilización del recurso.

Tabla 2.1: *Clasificación de la energía geotérmica.*

Energía geotérmica	Temperatura	Utilización del recurso
Alta temperatura	T> 150	Producción de energía eléctrica
Media temperatura	90-150	Producción de energía eléctrica mediante el uso de plantas de ciclo binario
Baja temperatura	25- 90	Uso directo del calor
Muy baja temperatura	T< 25	Agua caliente y aire acondicionado mediante bombas de calor.

Por otro lado, el calor en la materia sólida se transfiere mediante tres procesos: conducción, convección y radiación, la tierra al ser sólida presenta los tres procesos mencionados con anterioridad, sin embargo, debido a las temperaturas en la que se manifiestan los sistemas geotérmicos no se toma en cuenta el proceso de trasnferencia de calor por radiación. Por otro lado, los otros dos fenómenos de transferencia de calor, los cuales son: conducción y convección, dan lugar a diferentes comportamientos en los sistemas geotérmicos [12]. En consecuencia, es posible clasificar a los diferentes sistemas geotérmicos es en función del tipo de reservorio que almacena el calor. En la Tabla 2.2 se presenta la clasificación con la que trabaja el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE) en general esta clasificación es ampliamente aceptada, de igual forma, se describe brevemente el sistema y su estado actual en México [13–15].

En específico, este proyecto se centrará en los sistemas hidrotermales, ya que son los más estudiados en México y los que representan el 100 % de la producción del país. Por otra parte, el modelo

Tabla 2.2: *Descripción de los sistemas geotérmicos.*

Sistemas convectivos		
Sistemas geotérmicos	Descripción	Desarrollo de tecnología
Sistemas hidrotermales	*Conformados de una fuente de calor, agua (líquida y/o vapor) y roca almacén. *Se clasifican en: vapor dominante, liquido dominante de alta y baja entalpía. *Poseen alta porosidad y permeabilidad.	Ampliamente desarollada, explotados para producción de energía eléctrica
Sistemas marinos	*Se caracterizan por ser de alta entalpía	Poco estudiados y poco desarrollo tecnológico
Sistemas magmáticos	*Se localizan en volcánicos activos. Son de alta temperatura ($\geq 800^{\circ}$ C).	Poco estudiados y poco desarrollo tecnológico
Sistemas conductivos		
Sistemas de roca seca caliente / mejorados	*Se caracterizan por con alto contenido calorífico, pero con poca o nada de agua. *Baja permeabilidad y/o porosidad.	Poco estudiados y poco desarrollo tecnológicos
Sistemas geopresurizados	*Se conforman de agua y metano disuelto a alta presión y temperaturas moderadas. *Ofrecen tres tipos de energía: térmica, química y mecánica.	Poco estudiados y poco desarrollo tecnológicos

de un yacimiento geotérmico de tipo sistema hidrotermal requiere de un conocimiento profundo de los parámetros físicos de la zona de estudio o campo, tales como permeabilidad, porosidad, temperatura del recurso, así como propiedades termodinámicas del fluido. Para evaluar de manera sencilla el potencial de un yacimiento, se requiere conocer o tener una aproximación tolerable de los siguientes parámetros [16]:

- Temperatura del yacimiento.
- Área del yacimiento.
- Espesor del yacimiento.
- Factor de recuperación.
- Porosidad de roca.
- Densidad de roca.
- Capacidad calorífica de roca.
- Presión de separación.
- Vida del proyecto.
- Temperatura ambiente.

Si bien algunos parámetros pueden conocerse de manera precisa, algunos otros son estimados, pero con gran incertidumbre, es importante hacer énfasis en que los fenómenos subterráneos son siempre inciertos.

2.2.1. Evaluación de recurso geotérmico

Dado que los proyectos geotérmicos implican una inversión inicial muy grande, la evaluación del recurso geotérmico tiene un rol crucial en cuantificar la cantidad de energía térmica útil para producir energía eléctrica o de aplicación directa (calor). En otras palabras, el éxito del desarrollo de un proyecto geotérmico está relacionado con el diseño de una metodología robusta de evaluación del recurso geotérmico, que pueda predecir, con un bajo nivel de incertidumbre, la cantidad de energía que está almacenada y puede ser extraída y utilizada por un determinado reservorio geotérmico. Dicha evaluación de recurso geotérmico, brinda confiabilidad al proyecto para las diversas áreas:

inversionistas, entidades de financiamiento, grupos de investigación, empresas suministradoras de servicio eléctrico, compañías de exploración de yacimientos,entidades de gobierno, entre otras áreas que están involucradas en el desarrollo de un proyecto geotérmico. De manera general, los proyectos geotérmicos se desarrollan en etapas: (*i*)exploración superficial,(*ii*) exploración profunda,(*iii*) ingeniería y construcción, y (*iv*) operación y mantenimiento [17]. De forma específica, en la etapa de exploración superficial, sólo se cuentan con datos superficiales del sistema, en algunas ocasiones se realizan una serie de pozos testigo, pero dichos pozos son someros. Una vez que se tiene algun prospecto, se pasa a la etapa de expoloración profunda, en la cual se perforan pozos de mayor profundidad. En estás etapas son en las que se analiza la factibilidad del pozo, conforme avanza el proyecto geotérmico se obtiene más información del reservorio. Por tanto, se aplican distintas técnicas de modelado geotérmico. Es impotante mencionar que los yacimientos geotérmicos son dinámicos en el tiempo de exploración, dado la extracción e inyección de fluido al sistema. Dicha situación tiene como consecuencia un cambio en las propiedades termodinámicas del sistema, que si bien no se dan de forma repentina, deben ser consideradas. Por tanto, es importante tener un modelo del sistema geotérmico que permita saber el desempeño del sistema geotérmico dados distintos escenarios de producción.

2.3. Sistemas geotérmicos de baja-media entalpía

Los yacimientos geotérmicos de entalpía media se caracterizan por la temperatura de sus fluidos, que suele oscilar entre $\geq 65^{\circ}$ C y $\geq 150^{\circ}$ C. Esta clasificación los sitúa entre los recursos geotérmicos de baja y alta entalpía, lo que permite diversas aplicaciones en la generación de energía y sistemas de calefacción [18, 19].

Los rangos de temperatura específicos son esenciales para determinar la idoneidad de estos yacimientos para la explotación geotérmica, especialmente en zonas con condiciones geológicas favorables.

De forma especifica, en México, los sistemas geotérmicos de baja y media entalpía representan una alternativa sostenible y eficiente para el aprovechamiento de la energía térmica del subsuelo, especialmente en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Estos sistemas, que operan con temperaturas inferiores a los $\geq 150^{\circ}$ C, se utilizan principalmente para calefacción, climatización de espacios, balnearios y procesos industriales de baja demanda térmica. Estados como Baja California, Jalisco y Michoacán cuentan con un notable potencial geotérmico de este tipo, gracias a su actividad volcánica y características geológicas. Aunque históricamente el país ha enfocado su desarrollo geotérmico en la generación eléctrica con recursos de alta entalpía, en los últimos años ha crecido el interés por diversificar el uso de esta fuente renovable, impulsando proyectos piloto, normativas y estudios técnicos que promuevan la adopción de tecnologías de baja y media entalpía como parte de la transición energética nacional.

En el contexto de México, el proyecto híbrido Agua Prieta II, ubicado en el estado de Sonora, México, es un caso emblemático de integración de energías renovables en el país. Se trata de la primera central híbrida solar-gas natural en México, y combina un ciclo combinado de generación eléctrica con un campo solar, lo que permite mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes. Este proyecto representa un paso importante hacia la diversificación de la matriz energética mexicana, al demostrar que es posible integrar fuentes renovables con tecnologías convencionales de forma eficiente. Además, sirve como modelo para futuras plantas híbridas en regiones con alto recurso solar y potencial geotérmico o de gas natural [20].

2.4. Modelado matemático de yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos se encuentran, por lo general, en formaciones geológicas compuestas por materiales porosos y/o fracturados que permiten la acumulación y el flujo de fluidos termales. El estudio de estos sistemas requiere herramientas que representen con precisión los procesos de transporte que ocurren en el subsuelo. Para ello, el modelado en medios porosos constituye una

base fundamental, ya que permite describir el comportamiento del fluido geotérmico (líquido, vapor o mezcla) al interior del reservorio, considerando parámetros como la porosidad, permeabilidad, y la distribución de presiones y temperaturas. La interacción entre el fluido y el medio sólido, así como los gradientes de presión y temperatura, determinan la dinámica del sistema geotérmico. Así, el modelado matemático permite simular el comportamiento del yacimiento bajo distintos escenarios de operación y extraer información útil para la planificación de la explotación, predicción de vida útil y diseño de sistemas de conversión energética.El modelado matemático de yacimientos geotérmicos de entalpía media implica la aplicación de ecuaciones de balance de masa, junto con los principios rectores de la dinámica de fluidos y la termodinámica. Los principios físicos fundamentales que sustentan estos modelos se basan en la conservación de la masa, el momento y la energía, esenciales para representar con precisión los sistemas geotérmicos [21–23].

Se han desarrollado diversos modelos matemáticos con la finalidad de predecir el comportamiento de yacimiento geotérmico. Los cuales pueden dividirse en dos grandes grupos: (*i*) los modelos que no requieren datos históricos solo se utilizan algunos parámetros de un punto en el yacimiento, por tanto, son ideales para estimar la energía geotérmica de un nuevo campo y (*ii*) los históricos, los cuales requieren datos de perforación para estimar el recurso geotérmico.

2.4.1. Modelos de punto único

Los modelos de punto único son ampliamente utilizados en la primera etapa de prospección de sistemas geotérmicos. En dicha etapa no se cuenta con suficiente información respecto al yacimiento geotérmico, por tanto, se usan modelos con variables que se pueda obtener mediante un solo pozo o bien con información superficial del terrero [17]. En la Tabla 2.3 se presentan los modelos de punto único más aplicados, sus principales características, así como sus fortalezas y debilidades [24–26]. Cabe señalar que el modelo que mayor aplicación tiene en esta categoría es el modelo volumétrico. No obstante, en su mayoría, los modelos de punto único tienden a sobreestimar el yacimiento geotérmico,

Tabla 2.3: *Descripción de los principales modelos de punto único.*

Punto único			
Nombre del modelo	Descripción	Fortalezas	Debilidades
Método de flujo de calor superficial	Aproxima la cantidad mínima total de calor que se puede extraer.	Monitorear efectos de explotación y sobreexploración.	Bajas estimaciones de la capacidad de potencial.
Flujo total del pozo	Aproximación de la energía extraída del pozo después de una prueba de descarga.	Demuestra la habilidad del campo para entregar fluidos.	No calcula la capacidad de energía,el valor es dependiente al número de pozos.
Método volumétrico	La potencia de energía se estimada mediante el producto de la recuperación energía termal y la eficiencia.	Es simple de aplicar y válida para cualquier fuente geotérmicas.	No estima el reservorio útil para explotar y tampoco considera el factor de recuperación.

es por esto que se requieren de otro tipo de modelos para evaluar la factibilidad de los proyectos geotérmicos.

2.4.2. Modelo histórico

Los modelos históricos se utilizan cuando se tiene mayor información del sistema geotérmico. Dichos modelos permiten estimar el desempeño del pozo dado distintos escenarios de performación. En la Tabla 2.4 se presentan los modelos historicos con mayor aplicación, sus principales características, así como sus fortalezas y debilidades [24].

En los modelos históricos se requieren datos históricos de la producción, en este grupo destaca el modelo de simulación numérica del reservorio y el modelo de tanques. Así mismo, un proyecto geotérmico implica una inversión considerable, en consecuencia para la evaluación de factibilidad del proyecto se utilizan varios modelos. En la etapa temprana del proyecto no se cuenta con suficiente información, por tanto, se utilizan los modelos de punto único. Para considerar un reservorio geotérmico

Tabla 2.4: *Descripción de los principales modelos históricos.*

Históricos			
Nombre del modelo	Descripción	Fortalezas	Debilidades
Análisis de disminución	De alta replicabilidad y estima el potencial del recurso en un corto tiempo.	Es útil para proporcionar pronósticos de flujo de producción a corto plazo.	No es recomendable para la estimación de reservas a largo plazo.
Parámetros agrupados	El reservorio se considera un tanque,se usan las propiedades promedio para describir el reservorio	Es útil para estudiar la reacción del reservorio por producción y para estimar decaimiento térmico.	Tiene capacidad predictiva limitada
Simulación del reservorio	Es un proceso continuo de interpretación de datos con forme a un modelo para cada reservorio.	La complejidad de los sistemas geotérmicos es mejor representada mediante su implementación	Alta complejidad.

como prospecto deben aplicarse varios estudios geológicos, géofísicos, geoquímicos a la par de la aplicación de modelos de punto único. Una vez que se cuenta con un prospecto de reservorio, se utilizan los modelos históricos y estos se aplican durante toda la etapa de explotación, ya que los sistemas geotérmicos suelen ser muy dinámicos en el tiempo de explotacción y producción. Dado a que el presente proyecto está enfocado a dispositivos que permitan el diseño de infraestructura para aprovechamiento de los recursos geotérmicos, y dado a que dichas actividades de diseño se realizan perforando una serie de pozos que permitan corroborar la factibilidad del reservorio, se utilizará un modelo correspondiente a los históricos. De los modelos existentes en esta categoría los más sobresalientes son la simulación numérica de reservorios y los modelos de tanques. La bibliografía señala que para la implementación del método por simulación numérica de reservorios se utiliza una gran cantidad de información y recurso informático y los resultados no presentan gran diferencia con respecto a los del modelo de tanques. En ese sentido, los modelos de tanques presentan una buena relación entre eficacia y simplicidad.

Modelo de tanques o de parámetros agrupados

En secciones anteriores, se presentaron los distintos tipos de sistemas geotérmicos, los más abundantes son los que van de baja a media temperatura. De forma específica, para los sistemas de baja temperatura, de líquido dominante, química de fluido constante y en los cuales no se considera la reinyección del agua fría al sistema geotérmico, se consideran tres partes principales que conforman el reservorio: (*i*) parte central del reservorio, (*ii*) parte externa del reservorio y (*iii*) fuente de recarga, en la Figura 2.2 se muestra la representación de dichas partes [2].

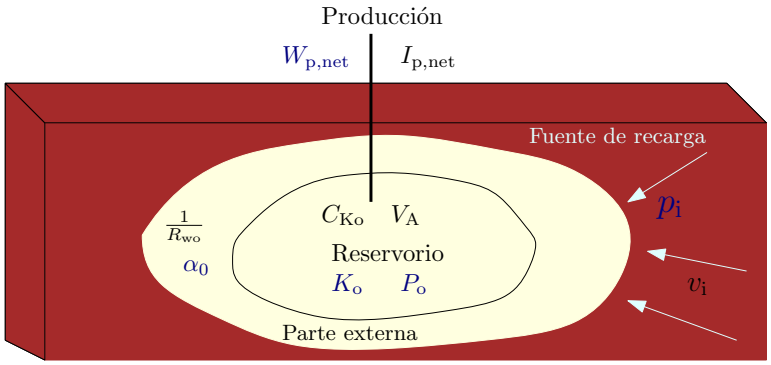

Figura 2.2: *Estructura de un sistema geotérmico [2].*

Si bien existen varias configuraciones de modelos de tanques, todos se rigen bajo el mismo principio, cada una de las partes principales del reservorio se consideran cajas cerradas o abiertas, dependiendo el modelo que se implemente [17].

Por otro lado, los sistemas geotérmicos pueden ser caracterizados matemáticamente por las ecuaciones de balance de masa y energía [17]. Recordemos que para el caso de estudio se considera baja o media temperatura, sistema de líquido dominante de una sola fase, la química del fluido constante, no se considera reinyección de agua fría al sistema y se interpreta el sistema como un fluido isotérmico, por tanto, se considera el fluido del sistema geotérmico con temperatura constante, presión y volumen variable. Esto último permite que solo se consideren las ecuaciones de balance de masa y no de energía [2].

El modelo de tanques se ha utilizado se ha utilizado en los ultimos años para analizar fenómenos más complejos de los sistemas geotérminos. En [27] se presenta un método para predecir el rendimiento geotérmico a lo largo de la vida productiva utilizando un modelo de parámetros agrupados o modelo de tanques, el cual toma en cuenta el balance de masa, los cambios de calor y el flujo en medios porosos en yacimientos geotérmicos. Además, el modelo de tanques proporciona más información sobre las características de los yacimientos geotérmicos. Mediante dicho modelo se pueden calcular el balance de calor y masa para condiciones no isotérmicas con cambios de presión y temperatura. Además, se incluye la ecuación de Darcy para cambiar el concepto de "tanque.ª medios porosos como una condición real de yacimiento. De esta manera, se puede calcular la tasa de masa de producción. El modelo desarrollado se puede utilizar para realizar la calibración histórica, un çonteo rápido"de la simulación numérica debido a que se calcula pozo por pozo, y si se combinan, se puede determinar todo el yacimiento con un cálculo simple. Por otro lado, este método reduce la complejidad del cálculo numérico.

Por otro lado, el modelo de tanques puede ser adaptado a diversas áreas de estudio. Por ejemplo, en [28] se tiene como objetivo analizar el rendimiento energético y la viabilidad económica de un innovador sistema integrado de alta eficiencia impulsado por geotermia, diseñado para una aplicación de calor y electricidad combinados (CHP, por sus siglas en inglés). El sistema consta de un intercambiador de calor (HEX) y un ciclo orgánico Rankine transcítico (ORC) que operan en paralelo para aprovechar una fuente geotérmica de alta temperatura (230 °C) y satisfacer la demanda energética de un centro comercial ubicado en el sur de Italia. De forma especifica, se desarrolló un modelo de tanques para encontrar las condiciones operativas adecuadas y evaluar la producción de energía de manera horaria durante todo el año. En particular, se implementó una optimización multivariable para encontrar la configuración más adecuada, y se seleccionó un ORC de 101.4 kWel, mientras que la potencia nominal de HEX fue de 249.5 kWth. La viabilidad económica del sistema integrado se evaluó en términos de valor presente neto y período de recuperación, y se compararon diferentes estrategias operativas: impulsada por calor, impulsada por electricidad y una estrategia mixta. Esta última resultó ser la mejor

solución según criterios tanto energéticos como económicos, con autoconsumos eléctricos y térmicos superiores al 90 por ciento sin eliminación de calor y un tiempo de recuperación cercano a cinco años.

En [28], se propone un enfoque de modelado de parámetros para predecir las variaciones en el caudal, temperatura y composición química de manantiales como resultado de la explotación de un yacimiento geotérmico. Basado en la suposición de que un yacimiento geotérmico puede ser discretizado a unos pocos bloques homogéneos, el modelo combina un modelo de tanque no isotérmico de yacimientos geotérmicos dominados por líquidos con las ecuaciones de balance de masa y calor de los manantiales termales. El modelo propuesto se aplica para simular el impacto de la utilización del yacimiento geotérmico en un importante manantial termal en el sistema geotérmico de Sabalan en el noroeste de Irán. Este modelo puede proporcionar una visión preliminar de los procesos subyacentes de un sistema geotérmico en las primeras etapas de un yacimiento cuando los datos son escasos. Además, el breve tiempo de simulación del modelo lo convierte en una opción atractiva para análisis de incertidumbre y procedimientos de simulación-optimización, donde a menudo se requiere un alto número de simulaciones del modelo.

2.5. Principios de conservación aplicados al modelado (masa, energía, momento)

Las ecuaciones que rigen el modelado de yacimientos geotérmicos suelen consistir en tres ecuaciones de balance principales: balance de masa, balance de energía y balance de momento. Estas ecuaciones proporcionan un marco para comprender el comportamiento dinámico de los fluidos dentro del yacimiento. La ecuación de balance de masa es particularmente crucial, ya que garantiza que la masa del fluido que entra y sale del sistema se mantenga constante, de acuerdo con el principio de conservación de la masa [23, 29]. La forma general de un balance de masa puede expresarse matemáticamente, indicando que la masa que entra en un sistema debe salir o acumularse en él.

Este principio puede aplicarse a diversas fases presentes en un sistema geotérmico, lo que permite la caracterización de las interacciones de fluidos y la dinámica del flujo [22,23].

De forma específica, el modelado de sistemas geotérmicos se fundamenta en los principios de conservación, que constituyen leyes físicas fundamentales para describir el comportamiento de los fluidos en medios porosos:

- Conservación de la masa: establece que la masa no se crea ni se destruye dentro del sistema. Para un volumen de control, el cambio de masa en el tiempo es igual a la diferencia entre el flujo de entrada y salida, más cualquier fuente o sumidero interno. Es la base para modelar el caudal de fluidos geotérmicos.
- Conservación de la energía: relaciona el flujo térmico con los cambios de entalpía del fluido y las transferencias de calor desde o hacia el medio poroso. Permite modelar la evolución térmica del sistema.
- Conservación de la cantidad de movimiento (o momento lineal): se aplica mediante la ley de Darcy para describir el flujo del fluido a través del medio poroso en función de los gradientes de presión y la permeabilidad del material.

En modelos completos, estas ecuaciones se resuelven simultáneamente con condiciones iniciales y de frontera, lo que permite predecir la respuesta dinámica del yacimiento a distintas condiciones de explotación.

2.6. Energía geotérmica en las microrredes

La demanda mundial de energía continúa aumentando, y la contaminación y los perjudiciales gases de efecto invernadero originados por la quema de combustibles fósiles son motivo de preocupación [28]. La penetración de energías renovables en la red eléctrica, así como el flujo bidireccional de energía

entre la generación y los usuarios finales, también son potenciales. Un sistema de energía de microrred puede ayudar a distribuir la energía de centros de generación de energía renovable intermitente a centros de carga de manera más eficaz. El sistema de microrred utiliza de manera eficiente la electricidad de fuentes renovables como solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y biomasa [28]. La transición potencial hacia las energías renovables abre muchas posibilidades para las microrredes tanto conectadas a la red como aisladas. Se utilizan tecnologías digitales, dispositivos de medición de energía especializados, un sistema de comunicación rápido y eficiente, sistemas de almacenamiento de energía y técnicas de control dinámico. El sistema de microrred basado en energías renovables enfrenta numerosas vulnerabilidades tecnológicas y económicas debido a la volatilidad y dependencia ambiental de la energía renovable. Al investigar el sistema de microrred, entran en juego las complejas etapas de conversión de energía, la falta de normativas regulatorias estrictas, las operaciones y la gestión de la red, y las comunicaciones entre los controladores centralizados y descentralizados [28].

En ese sentido, los yacimientos geotérmicos de entalpía media tienen un potencial significativo en los sistemas de generación distribuida gracias a su capacidad para proporcionar una fuente de energía constante y fiable. La explotación de estos yacimientos ofrece ventajas como una menor dependencia de los combustibles fósiles y menores emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la descarbonización general del sector energético [30]

La implementación de diversas tecnologías de generación de energía geotérmica, como los sistemas de ciclo binario y ciclo combinado, ha demostrado ser prometedora para mejorar la eficiencia de la extracción de energía de recursos de entalpía media. Las plantas de ciclo binario utilizan fluidos geotérmicos de temperatura baja a moderada para producir electricidad, lo que las hace especialmente adecuadas para aplicaciones distribuidas donde se prefiere la generación de energía a menor escala. Al aprovechar el calor residual de estos sistemas, se puede aprovechar energía adicional, mejorando así la eficiencia general de conversión energética [2].

De mandera general, los sistemas híbridos que integran la energía geotérmica con otras fuentes

renovables, como la energía solar térmica, representan un enfoque innovador para mejorar la generación de energía en sistemas distribuidos. Estas configuraciones híbridas pueden mitigar la intermitencia de la energía solar al proporcionar una fuente de calor continua, eliminando así la necesidad de almacenamiento térmico [2]. Esta sinergia no solo optimiza el uso de recursos, sino que también reduce los costos de capital asociados con instalaciones independientes [31].

2.7. Energía geotérmica en México

A nivel mundial, México se ha mantenido históricamente dentro de los primeros 5 países con mayor capacidad geotérmica instalada. En la Figura 2.3, se presenta un gráfico en donde dada la capacidad geotérmica nacional instalada en 2017 México estuvo en la séptima posición, dicha capacidad se expresa en Mega Watts. Sólo por debajo los países de Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, Turquía y Nueva Zelanda. Cabe destacar que, [32] en América Latina, México tiene la mayor capacidad de aprovechamiento geotérmico ya instalado.

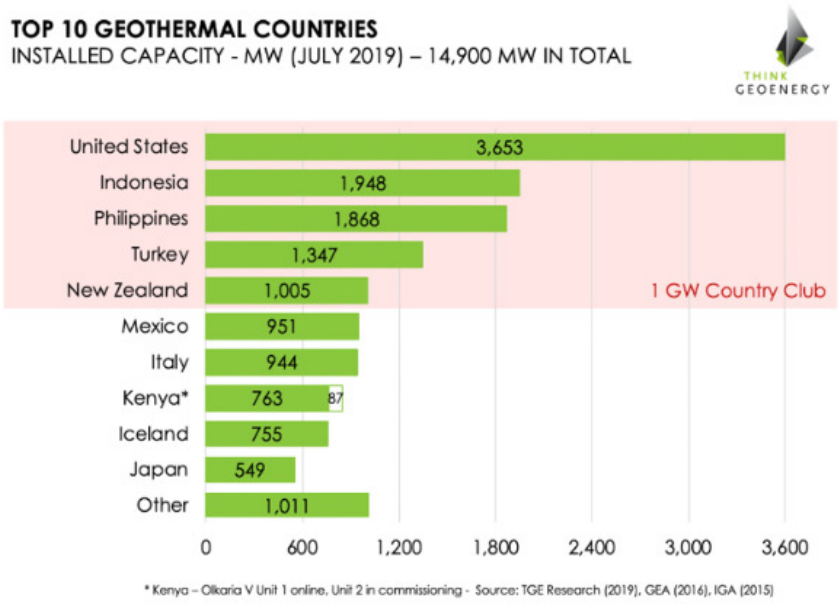

Figura 2.3: *Capacidad geotérmica instalada en 2019 a nivel mundial [3].*

Tabla 2.5: *Potencial de Generación eléctrica con energías limpias en México. Fuente: INERE [1].*

Recursos	Eólica	Solar	Hidráulica	Geotérmica	Biomasa
Probado	19,805.0	16,351.0	4,796.0	2,355.0	2,396.0
Probable	-	-	23,028.0	45,207.0	391.0
Posible	87,600.0	6,500,000.0	44,180.0	52,013.0	11,485.0

De manera específica, en México las energías renovables desarrolladas son la eólica, solar, hidráulica, geotérmica y biomasa. En la Tabla 1 se muestra el potencial de generación eléctrica con energías limpias. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) el mayor potencial probado para generación de electricidad, es decir, aquel que cuenta con estudios técnicos y económico que comprueban la factibilidad de su aprovechamiento, es la energía eólica. Así mismo, el mayor potencial probable identificado, aquel que cuenta con los estudios de campo que comprueban la presencia del recurso, pero que no son suficientes para evaluar la factibilidad técnica y económica de explotación, corresponde a los recursos geotérmicos. Finalmente, el mayor potencial posible se refiere al potencial teórico de los recursos pero que carecen de los estudios necesarios para evaluar la factibilidad técnica y los posibles impactos económicos, ambientales y sociales. En dicho rubro el mayor es la energía solar [1]. En la Tabla 2.5 se encuentran marcados con rojo los de mayor potencial de cada rubro.

En cuanto a energía geotérmica en el país, en 2015 se reportaron ocho plantas de generación eléctrica en cuatro campos geotérmicos con una capacidad de 925.6 MW. En la Figura 2.4, se observa el desarrollo de la capacidad efectiva instalada y la generación bruta de las centrales geotérmicas en el intervalo del año 2005 al 2015. Se puede observar una disminución en la capacidad, y por tanto la generación, en los años de 2011 al 2014. Sin embargo, entre 2014 y 2015 se impulsó la Ley de Energía Geotérmica, en consecuencia, se incrementó la energía un 5.5 % [1].

La energía geotérmica en nuestro país se desarrolla y aprovecha a paso firme. En la Figura 2.5, se

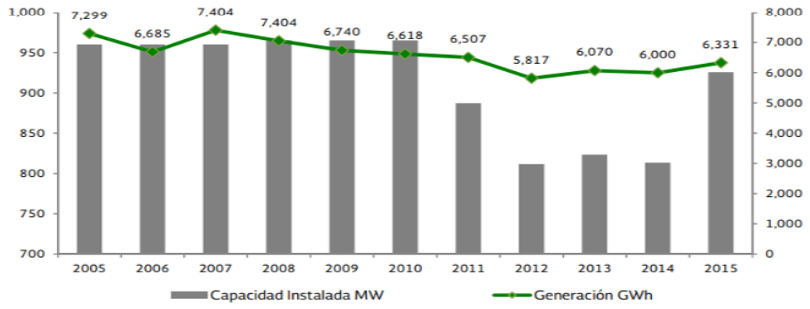

Figura 2.4: *Capacidad efectiva instalada y generación bruta de centrales geotérmicas, 2005 -2015 (MW, GWh) [1].*

muestra la evolución de las adiciones de capacidad, la capacidad instalada y generación de la tecnología geotérmica en el intervalo del año 2016 al 2030.

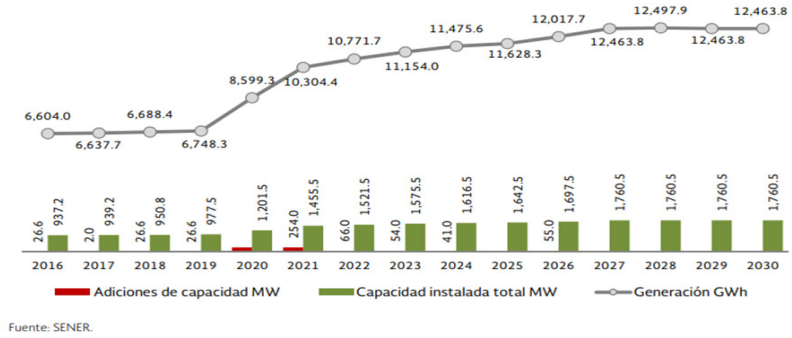

Figura 2.5: *Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de la tecnología geotérmica 2016-2030 (MG, GWh) [1].*

En [32] mediante correlación de las mediciones de flujo de calor, eventos térmicos recientes y el entorno tectónico - geológico se definen 11 provincias geológicas, las cuales sirven de guía para la exploración y utilización del recurso geotérmico mediante los plays geotérmicos. En dicho estudio, se presenta el mapa de la Figura 2.6, en donde se da la ubicación en México de cada una de las 11 provincias, además de los flujos de calor correspondientes a cada área. Con base en los datos proporcionados en el estudio, podemos observar que México posee un gran recurso geotérmico, explotado y explorado. Las provincias fisiográficas son regiones en el que el relieve es el resultado de la acción de un mismo conjunto de agentes modeladores del terreno, así como origen geológico, tipo de suelo y de la vegetación que sustenta. De la Figura 2.7 se observa que los campos geotérmicos de

México están ubicados en zonas con mucha actividad sísmica. Dichas zonas presentan un alto gradiente geotérmico y zonas de manifestación de energía térmica.

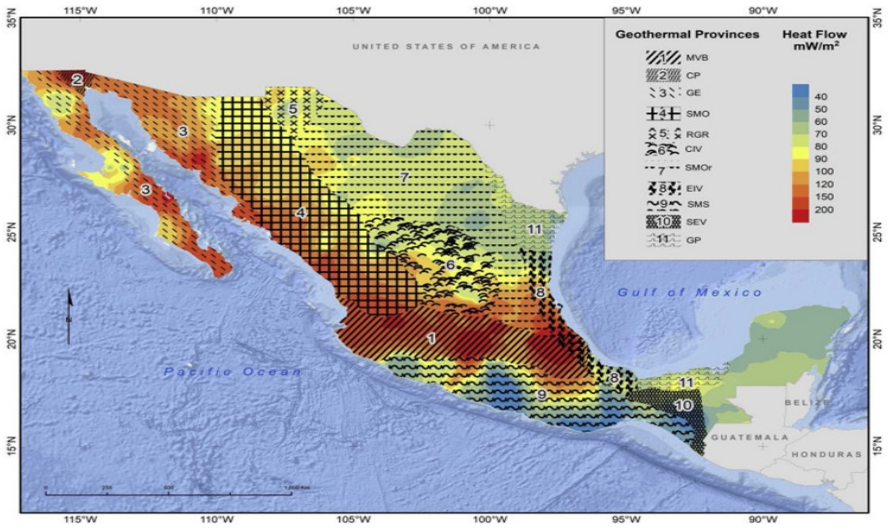

Figura 2.6: *Provincias geotérmicas y mapa de flujo de calor en México [1].*

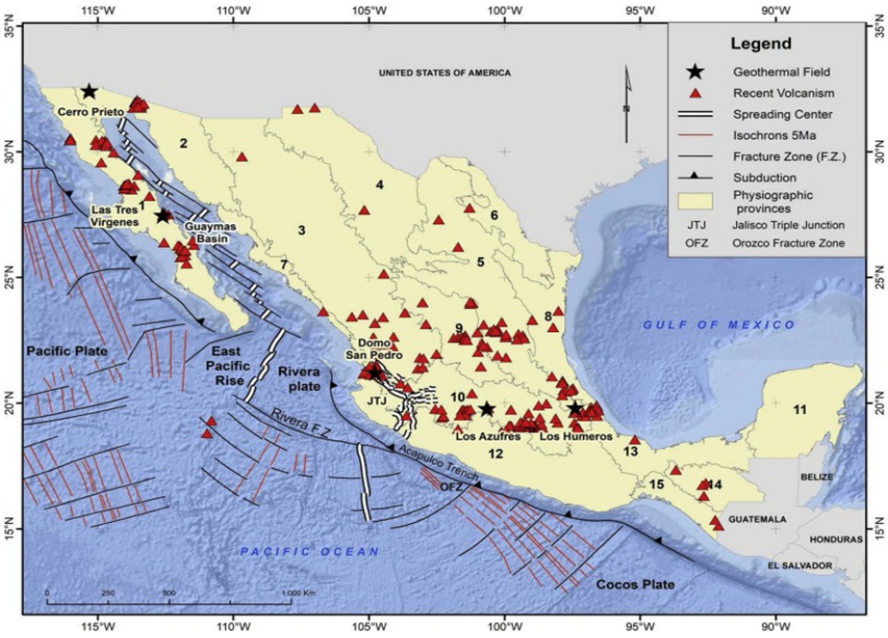

Figura 2.7: *Provincias fisiográficas y actividad volcánica reciente en México [1] .*

CAPÍTULO 3

Metodología

Este capítulo describe la metodología empleada para el desarrollo del modelo matemático simplificado de un yacimiento geotérmico de tipo hidrotermal de media entalpía, centrado exclusivamente en el balance de masa. El enfoque adoptado permite representar de forma general el comportamiento hidráulico del sistema, considerando únicamente las variables necesarias para su integración en simulaciones computacionales de microrredes híbridas.

Dado que el objetivo del proyecto es proponer una herramienta útil para simulación y análisis energético, más que una caracterización detallada del reservorio geológico, se optó por un modelo de baja complejidad, reproducible y de implementación accesible en entornos computacionales como MATLAB/Simulink. Este modelo se basa en principios de conservación, bajo supuestos que permiten reducir el número de variables y ecuaciones involucradas sin comprometer la representación funcional del sistema.

La metodología incluye la formulación matemática del modelo, la definición de parámetros representativos (como volumen poroso, caudal, presión y tasas de recarga/reinyección), y el desarrollo

de un entorno de simulación en el que se analiza el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios de operación.A continuación, se describen detalladamente las etapas del desarrollo del modelo, los supuestos considerados, las ecuaciones utilizadas, así como la estructura y condiciones del entorno de simulación.

3.1. Analogía del sistema de tanques a un circuito eléctrico

En la enseñanza de los circuitos eléctricos es común el uso de analogías físicas para facilitar la comprensión de conceptos abstractos. Una de las más utilizadas es la analogía hidráulica mediante sistemas de tanques interconectados, la cual permite interpretar visualmente variables fundamentales como la tensión eléctrica (V), la resistencia (R) y la intensidad de corriente (I). En esta representación, la presión del agua corresponde a la tensión eléctrica, la válvula que regula el flujo equivale a la resistencia, y el caudal del agua se asocia con la intensidad de corriente. Esta analogía es especialmente útil en ambientes educativos por su naturaleza intuitiva y su capacidad para ilustrar conceptos que, de otro modo, serían abstractos.

Siguiendo esta lógica, es posible extender dicha analogía para representar de manera simplificada el comportamiento de un sistema geotérmico mediante un circuito eléctrico. Dado que los yacimientos geotérmicos involucran procesos de flujo de masa, almacenamiento y variación de presión —todas ellas magnitudes dinámicas—, se puede establecer un paralelismo conceptual con los fenómenos eléctricos asociados al flujo de corriente, almacenamiento de carga y caída de voltaje.

En la Tabla 3.1 se presentan las principales variables que integran el sistema geotérmico y su correspondiente analogía con los circuitos eléctricos. Además, se indican sus respectivas unidades, lo cual permite establecer una comparación clara entre ambos dominios. Aunque los sistemas geotérmicos pueden involucrar una gran variedad de parámetros físicos, en esta analogía se seleccionan únicamente aquellas variables que tienen mayor influencia en el balance de masa del reservorio y que, al mismo tiempo, pueden representarse de forma funcional en un circuito equivalente.

Una de las variables fundamentales es la tasa de masa (W), que representa la cantidad de fluido (en forma líquida o de vapor) que circula en el sistema geotérmico. Este parámetro se puede descomponer en distintas componentes: producción (W_{p}), reinyección (W_{inj}), recarga natural (W_0) y masa inicial del sistema (W_{i}). . En el dominio eléctrico, esta variable encuentra su análogo en la

intensidad de corriente (I), que representa el flujo de carga eléctrica a través de un conductor.

Otra variable representativa es la presión (p) del reservorio, que está determinada por múltiples factores como la profundidad, litología, temperatura y el equilibrio líquido-vapor. Esta magnitud es clave para la extracción eficiente del recurso geotérmico y corresponde, en el circuito eléctrico, a la tensión (V), entendida como la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos del circuito.

La constante de recarga del reservorio (α), que define qué tan rápidamente el sistema puede recuperar fluido a través de procesos naturales, es análoga a la resistencia eléctrica (R), la cual indica la oposición al flujo de corriente. En ambos casos, se trata de un parámetro que modula la capacidad del sistema para responder ante una demanda o extracción constante. Finalmente, la constante de almacenamiento (k) del sistema geotérmico, que describe la capacidad del yacimiento para retener fluido, se asocia directamente con un condensador eléctrico (C), el cual almacena energía en forma de carga eléctrica. Ambos elementos reflejan la inercia del sistema ante los cambios en el flujo: en el caso geotérmico, retarda o amortigua las variaciones en la presión del reservorio.

Esta analogía, representada de forma esquemática en la Figura 3.1, permite modelar el comportamiento dinámico del sistema geotérmico como si fuera un circuito eléctrico de primer orden. Este enfoque no solo simplifica el análisis teórico y computacional, sino que también favorece la implementación de emuladores físicos o digitales en entornos de enseñanza, simulación o evaluación energética.

3.1.1. Circuito eléctrico equivalente del modelo simple de un tanque

Se puede establecer una analogía directa entre la ecuación de balance de masa y la ley de nodos de Kirchhoff, dado que ambas se fundamentan en el principio de conservación, el cual postula que la materia o la carga no se crea ni se destruye, únicamente se transforma o redistribuye dentro del sistema. En el contexto geotérmico, el balance de masa expresa que el cambio de masa dentro del yacimiento depende de las tasas de entrada (recarga natural, reinyección) y salida (producción), así como de las

Tabla 3.1: *Analogía de variables del sistema geotérmico al circuto eléctrico.*

Sistema geotérmico		Circuito eléctrico	
Nomenclatura	Variable	Nomenclatura	Variable
$w\ (\frac{kg}{s})$	Tasa de masa	$I\ (A)$	Intensidad corriente
$p\ (Pa)$	Presión	$V\ (V)$	Tensión eléctrica
$\frac{1}{\alpha}\ (\frac{kg}{sPa})$	Constante de recarga	$R\ (\Omega)$	Resistencia
$k\ (\frac{kg}{Pa})$	Constante de almacenamiento	$C\ (F)$	Capacitor

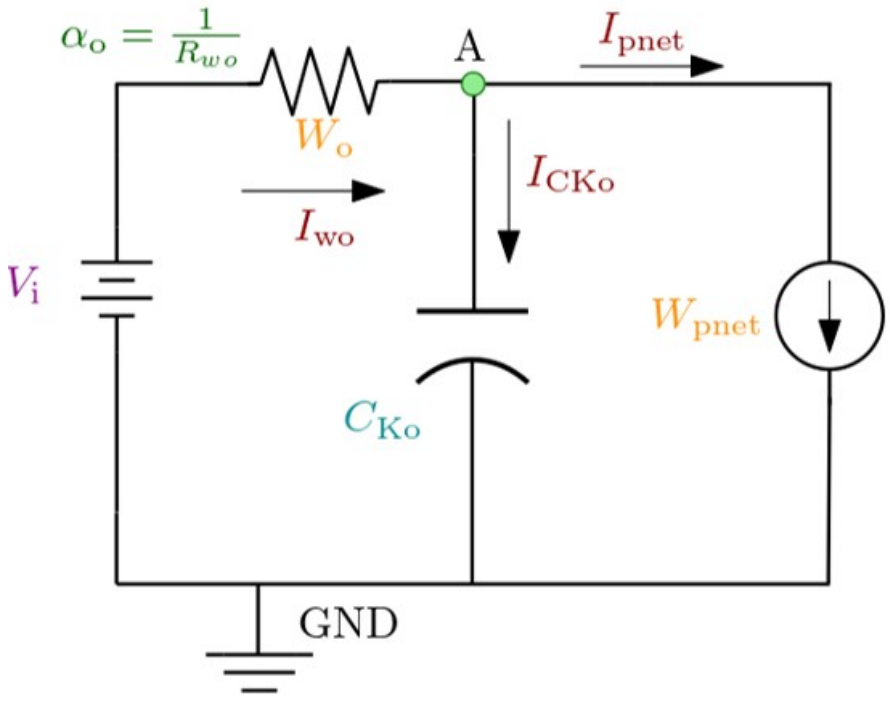

Figura 3.1: *Circuito eléctrico del modelo de un tanque*

variaciones internas debidas al almacenamiento y la presión del sistema. Por su parte, la ley de nodos de Kirchhoff establece que la suma algebraica de las corrientes que entran y salen de un nodo en un circuito eléctrico debe ser igual a cero, reflejando así la conservación de la carga eléctrica.

Al aplicar esta analogía al modelado de un sistema geotérmico mediante circuitos eléctricos, se observa que la ecuación de balance de masa incluye variables como la presión, la tasa de masa y la constante de almacenamiento; mientras que su contraparte eléctrica, derivada de la ley de Kirchhoff, involucra términos como la tensión (voltaje), la intensidad de corriente, la capacitancia (como almacenamiento de carga) y la resistencia (como oposición al flujo). Esta relación permite construir modelos de bloques que representan el comportamiento dinámico del sistema geotérmico en términos eléctricos, lo cual facilita su simulación en plataformas digitales. En la Figura 3.2 se ilustran las variables de entrada y salida que integran dicho modelo de bloques, permitiendo visualizar con claridad el flujo de información y su correspondencia física dentro del sistema.

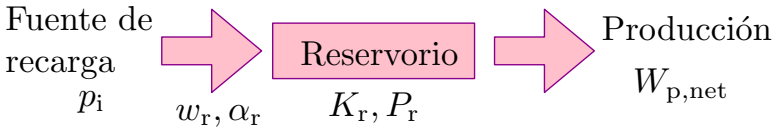

Figura 3.2: *Configuración de parámetros agrupados en el modelo simple.*

Por tal motivo, se presenta primero la analogía de las ecuaciones tomando como base el balance de masa y después se realiza el mismo análisis, pero con la ley de nodos de Kirchoff. Al final de ambos procedimientos obtiene la misma ecuación pero con variables distintas. A continuación, se muestra el análisis partiendo del balance de masa. Análisis mediante balance de masa La masa total w_{c} del sistema geotérmico es igual a la masa inicial w_{i} del sistema, menos la producción w_{p}, más cualquier ingreso de agua w_{o}, y la reinyección de masa w_{inj} .

$$W_{\mathrm{c}} = W_{\mathrm{i}} - W_{\mathrm{p}} + W_{\mathrm{o}} + W_{\mathrm{inj}} \tag{3.1.1}$$

La masa inicial del sistema es una relación de diversas características geológicas del reservorio, de forma simplificada se considera W_{i} como el producto entre el volumen del reservorio V_{r}, la porosidad del reservorio ϕ_{r}, y la densidad del líquido que se encuentra confinado en el reservorio ρ_{W}. Por tanto, se obtiene la igualdad 3.1.2.

$$W_{\mathrm{i}} = V_{\mathrm{r}} \phi_{\mathrm{r}} \rho_{\mathrm{W}} \tag{3.1.2}$$

Después, aplicamos la definición de compresibilidad isotérmica y además derivamos con respecto al tiempo. Considerando el volumen de reservorio como constante V_{r} y aplicando la fórmula del producto de uv, en donde $u = \emptyset_r$ y $v = \rho_r$.

$$V_r \frac{d\left(\emptyset_r \rho_r\right)}{dt} = V_r \left(\emptyset_r \frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \rho_r \frac{\partial \emptyset_r}{\partial t} \right) \tag{3.1.3}$$

Ya que, la variable a analizar es la presión del reservorio con respecto al tiempo, se agrega el termino de presión $\frac{dp}{dp} = 1$.

$$V_r \frac{\partial\left(\emptyset_r \rho_r\right)}{\partial t} = V_r \left(\emptyset_r \frac{\partial \rho_r}{\partial t} \frac{\partial p}{\partial p} + \rho_r \frac{\partial \emptyset_r}{\partial t} \frac{\partial p}{\partial p} \right) \tag{3.1.4}$$

$$= V_r \left(\emptyset_r \frac{\partial \rho_r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_r \frac{\partial \emptyset_r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \tag{3.1.5}$$

$$= V_r \frac{\partial p}{\partial t} \left(\emptyset_r \frac{\partial \rho_r}{\partial p} + \rho_r \frac{\partial \emptyset_r}{\partial p} \right) \tag{3.1.6}$$

Después, tomando como referencia que la compresibilidad total C_{t} de un sistema geotérmico es igual a la suma de la compresibilidad de la roca C_{r} y el fluido C_{f} contenido en la misma, se utilizan la ecuación $(c_{\mathrm{t}} = c_{\mathrm{f}} + c_{\mathrm{r}})$. En donde $c_f = \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \rho_r}{\partial p}$ y $c_r = \frac{1}{\emptyset_r} \frac{\partial \emptyset_r}{\partial p}$. Se sustituye dicha igualdad en 3.1.6, de igual forma se multiplica toda la expresión por el termino correspondiente para obtener la forma necesaria:

$$= V_r \emptyset_r \rho_r \frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \rho_r}{\partial p} + \frac{1}{\emptyset_r} \frac{\partial \emptyset_r}{dp} \right) \tag{3.1.7}$$

$$W_{\mathrm{i}} = V_r \frac{\partial \left(\emptyset_r \rho_r \right)}{\partial t} = V_r \emptyset_r \rho_r c_t \frac{dp}{dt} \tag{3.1.8}$$

Se sustituye la variable w_{i} en 3.1.1 con la expresión 3.1.8, y considerando la masa neta $w_{\mathrm{p,\ net}}$ como la masa de producción w_{p} menos la masa reinyectada w_{inj} $\left(w_{p,\ \mathrm{net}} = w_p - w_{\mathrm{inj}} \right)$ en () se consigue la expresión 3.1.9.

$$w_{\mathrm{o}} - w_{\mathrm{p,\ net}} = V_{\mathrm{r}} \phi_{\mathrm{r}} \rho_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{t}} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \tag{3.1.9}$$

En cuando a la masa de recarga w_{o} se considera como producto de la fuente de recarga constante del reservorio con la diferencia entre la presión $w_{\mathrm{o}} = \alpha_{\mathrm{r}} \left(p_{\mathrm{i}} - p_{\mathrm{r}} \right)$. Considerando a K_{r} como la capacidad de almacenamiento del reservorio como $\kappa_{\mathrm{r}} = V_{\mathrm{r}} \phi_{\mathrm{r}} \rho_{\mathrm{W}} c_{\mathrm{t}}$ se obtiene la ecuación 3.1.10.

$$w_{\mathrm{p,\ net}} = \alpha_{\mathrm{r}} \left(p_{\mathrm{i}} - p_{\mathrm{r}} \right) - \kappa_{\mathrm{r}} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \tag{3.1.10}$$

Se consiedera la presión inicial p_{i} como constante, la diferencia de la presión como $\Delta p = p_{\mathrm{i}} - p_{\mathrm{r}}$ se obtiene, además dejando solo el término de la derivada de la presión con respecto al tiempo.

$$\frac{\mathrm{d}\Delta p}{\mathrm{d}t} + \frac{\alpha_{\mathrm{r}}}{\kappa_{\mathrm{r}}} \Delta p = \frac{w_{\mathrm{p,\ net}}}{\kappa_{\mathrm{r}}} \tag{3.1.11}$$

Para resolver 3.1.11 se consideran las condiciones iniciales $p_{\mathrm{r}}(t = 0) = p_{\mathrm{i}}$ o $\Delta p(t = 0) = 0$, además, se aplica la transformada de Laplace.

$$\mathscr{L}\left(\Delta p' + \frac{\alpha_r}{k_r}\Delta p\right) = \mathscr{L}\left(\frac{w_{pnet}}{k_r}\right) \tag{3.1.12}$$

Para simplificar la ecuación se sustituye el termino Δp por x. Además se aplican las simplificaciones necesarias.

$$\mathscr{L}\left(x' + \frac{\alpha_r}{k_r}x\right) = \mathscr{L}\left(\frac{w_{pnet}}{k_r}\right) \tag{3.1.13}$$

$$xs + \frac{\alpha_r}{k_r}X = \frac{w_{pnet}}{k_r}\frac{1}{s} \tag{3.1.14}$$

$$x\left(s + \frac{\alpha_r}{k_r}\right) = \frac{w_{pnet}}{k_r}\frac{1}{s} \tag{3.1.15}$$

$$x\left(\frac{sk_r + \alpha_r}{k_r}\right) = \frac{w_{pnet}}{k_r}\frac{1}{s} \tag{3.1.16}$$

$$x = \frac{\frac{w_{\text{pnet}}}{k_r s}}{\frac{sk_r + \alpha_r}{k_r}} \tag{3.1.17}$$

$$x = \frac{w_{pnet}k_r}{k_r s\left(sk_r + \alpha_r\right)} \tag{3.1.18}$$

Se utiliza fracciones parciales para resolver lo necesario.

$$x = w_{\text{pnet}}\left(\frac{A}{s} + \frac{B}{\left(sk_r + \alpha_r\right)}\right); \quad \frac{A}{s} + \frac{B}{\left(sk_r + \alpha_r\right)} = \frac{1}{s\left(sk_r + \alpha_r\right)} \tag{3.1.19}$$

$$A\left(sk_r+\alpha_r\right)+Bs=1 \tag{3.1.20}$$

Cuando $s=0$, obtenemos que $A=\frac{1}{\alpha_r}$, por otra parte, cuando $S=-\frac{\alpha_r}{k_r}$ obtenemos que $B=-\frac{k_r}{\alpha_r}$. Por tanto:

$$x=w_{pnet}\left(\frac{\frac{1}{\alpha_r}}{s}+\frac{-\frac{k_r}{\alpha_r}}{\left(sk_r+\alpha_r\right)}\right) \tag{3.1.21}$$

$$x=\frac{w_{pnet}}{\alpha_r}\left(\frac{1}{s}-\frac{k_r}{\left(sk_r+\alpha_r\right)}\right) \tag{3.1.22}$$

Se aplica la transformada inversa de Laplace y se obtiene:

$$\mathscr{L}^{-1}(X)=\frac{w_{pnet}}{\alpha_r}\left[\mathscr{L}^{-1}\left(\frac{1}{s}\right)-\left[k_r\mathscr{L}^{-1}\left(\frac{1}{\left(sk_r+\alpha_r\right)}\right)\right]\right. \tag{3.1.23}$$

$$\Delta p(t)=\frac{w_{\mathrm{p,\ net}}}{\alpha_{\mathrm{r}}}\left[1-\exp\left(-\frac{\alpha_{\mathrm{r}}t}{\kappa_{\mathrm{r}}}\right)\right] \tag{3.1.24}$$

Esta última ecuación es la que se aplica para obtener el cambio en la presión en un determinado tiempo.

Por otro lado, a partir de la expresión obtenida en la ecuación (3.1.24) es posible describir el comportamiento dinámico del reservorio geotérmico en términos de la variable presión. Esta ecuación, que corresponde a una ecuación diferencial ordinaria de primer orden, puede ser representada de manera análoga mediante un circuito eléctrico equivalente, utilizando la ley de nodos de Kirchhoff como base para establecer las relaciones entre las variables del sistema. En este enfoque, cada elemento del circuito eléctrico simula un componente físico del sistema geotérmico, ya sea relacionado con la

producción, reinyección o almacenamiento de masa, todos ellos expresados en función de la presión del reservorio.

La estructura general del circuito propuesto se muestra en la Figura (3.1). En este diagrama se integran fuentes dependientes de corriente, las cuales representan el flujo de masa extraído del sistema geotérmico (producción) y el fluido reinyectado al mismo. Estas fuentes están modeladas como funciones proporcionales al radio de masa, definido como la tasa de flujo de masa dividida entre la constante de recarga del reservorio α_r. Específicamente, estas fuentes se expresan mediante los términos $\frac{wp}{\alpha_r}$ y $\frac{winj}{\alpha_r}$ respectivamente. De este modo, se garantiza que el circuito responda proporcionalmente al comportamiento físico del reservorio.

El modelo incluye además un resistor, cuya conductancia está determinada por el valor de la constante de recarga del reservorio α_r. En términos eléctricos, esto se representa como una resistencia inversamente proporcional a la constante de recarga: $R = \frac{1}{\alpha_r}$. Este componente modela la oposición del sistema al restablecimiento del equilibrio de presión por recarga natural o reinyección. Por otro lado, se incorpora un condensador eléctrico para representar la capacidad de almacenamiento del sistema, expresada mediante el parámetro k_r, el cual define cuánto fluido puede retener el reservorio ante variaciones de presión.

Es importante señalar que para la formulación de este modelo se consideran condiciones específicas del yacimiento geotérmico analizado: baja temperatura, sistema líquido dominante, comportamiento isotérmico del fluido y composición química constante. Bajo estas suposiciones, el modelo no está diseñado para estimar la potencia eléctrica generada, sino únicamente para analizar el comportamiento de la presión del reservorio en función del balance de masa. No obstante, como parte de trabajos futuros, se contempla ajustar el modelo para incorporar estimaciones del potencial de producción energética del sistema, ampliando así su aplicabilidad en contextos más complejos de simulación.

Finalmente, en la Tabla 3.2 se presenta la relación entre cada elemento del circuito propuesto, su equivalente en la ecuación de balance de masa y las unidades físicas correspondientes, lo cual facilita la

Tabla 3.2: *Elementos del circuito con su ecuación y sistema de unidades.*

Elemento del circuito	Elemento en la ecuación	Sistema de unidades	Equivalencia eléctrica	Sistema de unidades
Fuente	$\frac{wp}{\alpha_r}$	Pa	KV_x	V
Resistencia	$\frac{1}{\alpha_r}$	$\frac{sPa}{Kg}$	$\frac{1}{R}$	S
Capacitor	k_r	$\frac{Kg}{Pa}$	$\frac{Q}{V}$	F
Constante de tiempo	$\frac{\alpha_r}{k_r}$	$\frac{Kg}{Pa}$	RC	s

comprensión integral de la analogía establecida y su posible implementación en entornos de simulación.

En cuanto a la ecuación en términos eléctricos del cambio en la presión con respecto al tiempo obtenida en (3.1.24), dicha ecuación se presenta a continuación.

$$\Delta v(t) = I_{pnet} R_{w0} \left[1 - \exp^{\left(-\frac{1}{R_{w0} c_{k0}} t \right)} \right] \tag{3.1.25}$$

En cuanto al análisis en términos eléctricos, en la Figura (3.3) se presenta la ecuación de balance de masa en la parte inferior y en la parte superior su equivalente en términos eléctricos. Finalmente, en la Figura (3.4) se presenta la ecuación final para el cálculo de las variaciones de presión (para el balance de masa) y la variación de voltaje (para el análisis mediante la Ley de Kirchhoff). De esta forma, se presenta la analogía para el modelado matemático de los sistemas geotérmicos mediante variables eléctricas-electrónicas. Dicho análisis es la base, en donde solo se considera un solo tanque que corresponde al sistema geotérmico en su totalidad.

3.1.2. Circuito eléctrico equivalente del modelo de dos tanques

El modelo de dos tanques propuesto para representar el comportamiento del reservorio geotérmico se basa en su división conceptual en dos zonas diferenciadas. La primera corresponde a la zona

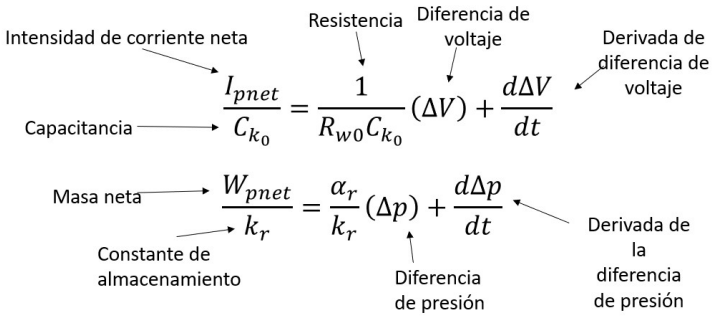

Figura 3.3: *Esquema de la Ley de Kirchhoff y balance de masas an el nodo A.*

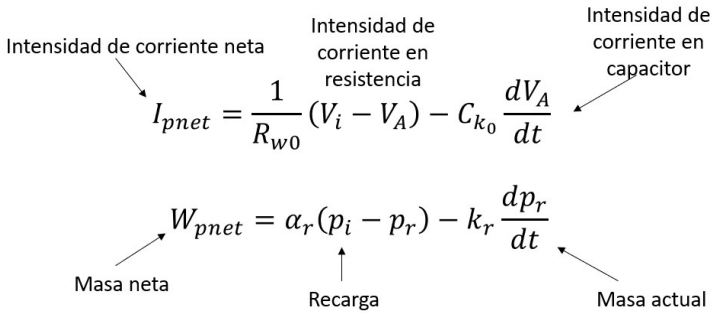

Figura 3.4: *Ecuaciones de cambio en el Voltaje y cambio en la Presión.*

interna o central del yacimiento, en la cual se concentran las operaciones de producción y reinyección del fluido geotérmico. Esta región es la más activa desde el punto de vista operacional y, por tanto, crítica para el mantenimiento de la presión en el reservorio. Es importante establecer una distinción entre dos tipos de reinyección: por un lado, la reinyección operativa, que consiste en devolver fluido al yacimiento con el objetivo específico de evitar el colapso de la estructura del subsuelo —esto se logra al compensar los vacíos generados por la extracción con fluido diseñado para no alterar las propiedades termodinámicas del sistema—; y por otro lado, la recarga natural, que proviene de zonas periféricas del sistema y ocurre como parte del ciclo hidrológico o de la conectividad hidráulica del reservorio.

La segunda parte considerada en el modelo corresponde a la zona externa del yacimiento, también conocida como la región de recarga natural. Esta zona cumple la función de abastecer progresivamente al reservorio mediante flujos subterráneos, y su interacción con la zona central depende de las propiedades hidráulicas y geológicas del medio poroso. La separación entre ambas regiones permite representar de

manera más precisa la dinámica del sistema y evaluar el efecto de las tasas de extracción, reinyección y recarga en la presión del reservorio.

En la Figura 3.5, se presenta el modelo de dos tanques, el cual permite describir el comportamiento del sistema mediante el balance de masa aplicado a ambas regiones. A su vez, este modelo está expresado de forma análoga en términos eléctrico-electrónicos, lo que permite su implementación en simuladores digitales o físicos. Las variables clave de cada tanque —como presión, tasa de masa y almacenamiento— se traducen a sus equivalentes eléctricos, como tensión, corriente y capacidad, respectivamente, facilitando su análisis dinámico bajo distintas condiciones operativas del sistema.

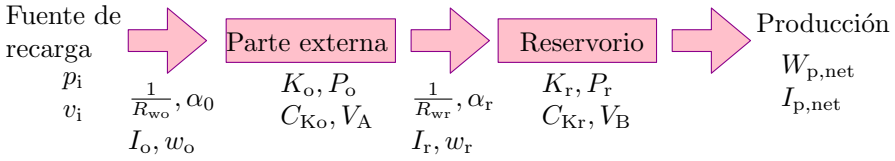

Figura 3.5: *Modelo de dos tanques con variables de balance masa y variables eléctricas*

En la Figura 3.6 se muestra el circuito para el modelo de dos tanques abierto o de segundo orden, se toma en consideración las mismas variables que el modelo de segundo orden, agregando un tanque y por tanto parámetros. Se observa que cuenta con los mismos elementos que el circuito equivalente de un tanque, con la diferencia que se se agrega una resistencia (R) y un capacitor (C).

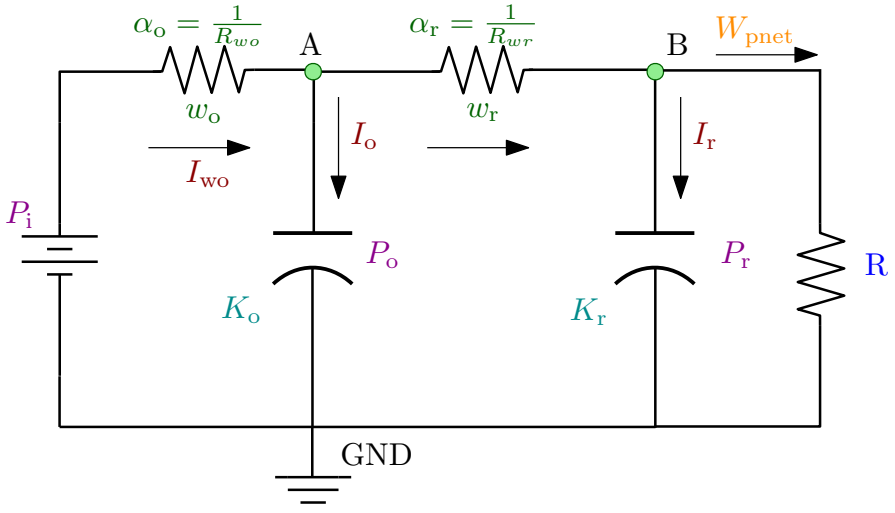

Figura 3.6: *Circuito del modelo de tanques de segundo orden*

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir del modelo matemático simplificado del yacimiento geotérmico de tipo hidrotermal. El objetivo principal es evaluar el comportamiento dinámico del sistema bajo distintas condiciones de operación, a través de simulaciones realizadas sobre el modelo desarrollado. Este análisis permite verificar la validez conceptual del enfoque propuesto, identificar la sensibilidad del sistema ante variaciones de parámetros clave, y explorar su posible integración en entornos de simulación para microrredes.

Los resultados se presentan en función de las variables principales que intervienen en el balance de masa del reservorio, tales como la presión, la tasa de producción, la reinyección y la recarga natural. Asimismo, se interpreta el efecto de cada componente del circuito eléctrico análogo en la evolución temporal de la presión del yacimiento, lo que facilita una comprensión más intuitiva de la dinámica del sistema.

Además, se incluyen escenarios comparativos que permiten observar el comportamiento del modelo bajo diferentes configuraciones de entrada, lo cual es fundamental para determinar su aplicabi-

lidad en contextos educativos y de simulación. Finalmente, se discuten las limitaciones del modelo y se plantean observaciones sobre su posible extensión futura para estimar producción energética o integrarse en plataformas de control para microrredes híbridas.

4.0.1. Simulación para el modelo de un tanque

MATLAB se ha consolidado como una de las plataformas más utilizadas para el desarrollo y simulación de sistemas eléctricos y de control, debido a su capacidad para integrar herramientas numéricas, visuales y de diseño en un entorno unificado. En particular, Simulink, una extensión de MATLAB orientada a la simulación basada en bloques, es ampliamente empleada para modelar y analizar el comportamiento dinámico de sistemas físicos, incluyendo circuitos eléctricos análogos a fenómenos térmicos, hidráulicos y geotérmicos.

En el presente trabajo, Simulink se empleó para implementar el modelo de circuito eléctrico equivalente a un sistema geotérmico de un solo tanque, con el fin de analizar su respuesta temporal ante condiciones iniciales definidas. En la Figura 4.1 se muestra el diagrama del circuito eléctrico modelado, que representa un reservorio geotérmico simplificado en términos de elementos eléctricos: fuente de corriente, resistor y capacitor.

Los resultados de la simulación se presentan en la Figura 4.2, donde se grafica la evolución de la presión del sistema (representada por la tensión en el circuito) en función del tiempo. En este escenario, se parte de una condición inicial de presión máxima correspondiente a la masa almacenada inicialmente en el sistema. Es importante señalar que, para esta simulación particular, no se consideró la reinyección de masa, por lo que el análisis se centra exclusivamente en el comportamiento de la presión como resultado del agotamiento progresivo del recurso a partir de la masa inicial disponible.

Este tipo de simulaciones permite anticipar el comportamiento del sistema ante distintas condiciones operativas, facilitando tanto la validación conceptual del modelo como su futura implementación en un emulador físico o plataforma de simulación educativa.

El modelado de reservorios geotérmicos es una herramienta fundamental para comprender el comportamiento térmico e hidráulico de los sistemas subterráneos utilizados en la generación de energía o en aplicaciones directas de calor. En este contexto, el uso de plataformas de simulación

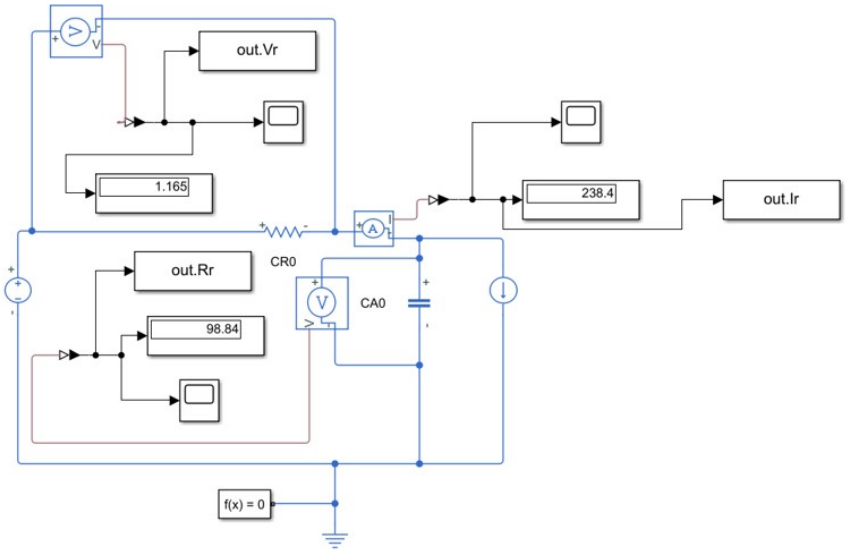

Figura 4.1: *Simulink para el modelo de un tanque.*

como Simulink permite representar de manera dinámica y visual los procesos físicos que ocurren en un tanque geotérmico, facilitando el análisis de variables clave como presión, temperatura y flujo de fluidos.

La simulación presentada corresponde a un modelo de tipo tanque simple, que fue el modelo que se desarrollo mediante circuitos eléctricos en la sección anterior, como se reviso en secciones anteriores este modelo es utilizado en estudios de reservorios geotérmicos de baja y media entalpía. Este modelo se basa en un enfoque de bloques, donde cada componente del sistema (como entradas de energía, flujos de producción, recarga y acumulación) se representa mediante bloques funcionales interconectados. En particular, se presenta en la simulación el uso de bloques de constantes físicas, sumadores, integradores y fuentes de flujo, que permiten resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs) asociadas al balance de masa del sistema.

En conjunto, el modelo en Simulink proporciona una plataforma robusta para la experimentación virtual, permitiendo a investigadores y operadores del sector geotérmico tomar decisiones informadas basadas en simulaciones realistas del comportamiento del subsuelo.

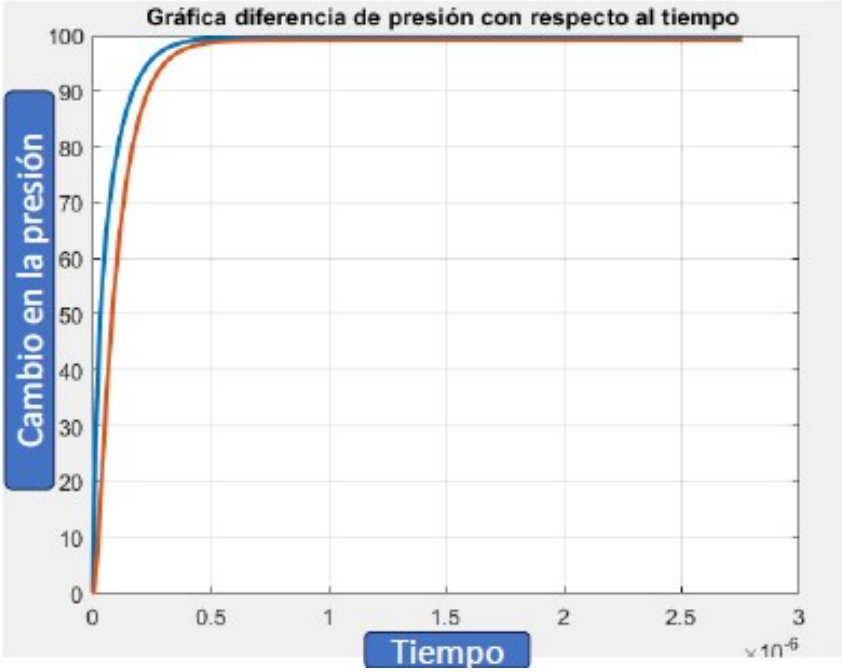

Figura 4.2: *Gráfica de presión con respecto al tiempo.*

La gráfica presentada en la gráfica 4.2, titulada “Diferencia de presión con respecto al tiempo”, se puede observar el comportamiento dinámico de un sistema geotérmico modelado como un tanque. En ella se representan dos curvas que muestran cómo varía la presión en función del tiempo bajo diferentes condiciones o configuraciones del sistema. Ambas curvas exhiben un incremento rápido de presión en los primeros microsegundos, seguido de una estabilización progresiva, lo cual sugiere que el sistema alcanza un nuevo estado de equilibrio tras una perturbación inicial.

Este comportamiento es característico de sistemas con capacidad de amortiguamiento hidráulico, donde la presión interna responde de forma transitoria a cambios en los flujos de entrada o salida. La estabilización observada indica que el modelo es capaz de simular adecuadamente la respuesta del reservorio ante eventos como la inyección o extracción de fluido, lo cual es fundamental para evaluar la sostenibilidad del recurso geotérmico.

En conjunto, la simulación valida la utilidad del modelo de tanque para representar procesos de transferencia de masa y energía en reservorios geotérmicos, y proporciona una base sólida para el

análisis de estrategias de explotación que minimicen la pérdida de presión y maximicen la eficiencia del sistema.

CAPÍTULO 5

Conclusiones Generales y Trabajos Futuros

5.1. Conclusiones Generales

La gráfica presentada , titulada “Diferencia de presión con respecto al tiempo”, permite observar el comportamiento dinámico de un sistema geotérmico modelado como un tanque. En ella se representan dos curvas que muestran cómo varía la presión en función del tiempo bajo diferentes condiciones o configuraciones del sistema. Ambas curvas exhiben un incremento rápido de presión en los primeros microsegundos, seguido de una estabilización progresiva, lo cual sugiere que el sistema alcanza un nuevo estado de equilibrio tras una perturbación inicial.

Este comportamiento es característico de sistemas con capacidad de amortiguamiento hidráulico, donde la presión interna responde de forma transitoria a cambios en los flujos de entrada o salida. La estabilización observada indica que el modelo es capaz de simular adecuadamente la respuesta del reservorio ante eventos como la inyección o extracción de fluido, lo cual es fundamental para evaluar la

sostenibilidad del recurso geotérmico.

En conjunto, la simulación valida la utilidad del modelo de tanque para representar procesos de transferencia de masa y energía en reservorios geotérmicos, y proporciona una base sólida para el análisis de estrategias de explotación que minimicen la pérdida de presión y maximicen la eficiencia del sistema.

5.2. Contribuciones

A continuación de presentan las contribuciones producto de este trabajo:

- Equivalencia del sistemas geotérmico a circuitos eléctricos,modelo de un tanque y dos tanques.
- Desarrollo de un modelo dinámico simplificado.
- Implementación del modelo en Simulink.

5.3. Recomendaciones para trabajos futuros

A continuación de presentan los trabajos futuros del proyecto:

- Desarrollar los modelos matemáticos con diversas configuraciones.
- Simular con varios escenarios criticos.
- Incluir las ecuaciones de balance de energía.

5.4. Actividades realizadas

A continuación se presentan las actividades realizadas durante el posgrado:

- María Andrea Olivo Calles, Diana Karen García Ventura, Josue Francisco Rebullosa Castillo, Manuel Alejandro GarcíaPerales, Brenda Lizeth Reyes García, "Photem", InnovaTECNM 2023 etapa local, regional y nacional.

- Aracely Zapién Castillo, José Ángel Zumaya García, Brenda Lizeth Reyes García, Pedro Martín García Vite(2022). "SAD y minería de datos FV". InnovaTECNM 2022 etapa local, regional y nacional.

- Participación en el 1er. Coloquio Interistitucional de Investigación Básica y de Frontera 2023, UAT.

5.5. Publicaciones

A continuación se presentan las publicaciones académicas :

- Pedro Martín García Vite, Josue Francisco Rebullosa Castillo, Manuel AlejandroGarcíaPerales,BrendaLizethReyesGarcía,(2023)."Commutationstrategyforreducedoutputvoltagerippleinalternativecascadedb

- María Andrea Olivo Calles, Pedro Martin Garcia Vite, Diana Karen García Ventura, Brenda Lizeth Reyes García, Luis Fortino Cisneros Sinencio(2023)."Control de un convertidor Cuk de voltaje para seguimiento de curva de una celda fotovoltaica".ColoquiodeinvestigaciónmultidisciplinariajournalCIM,11(1).

- Aracely Zapién Castillo, José Ángel Zumaya García, María Andrea Olivio Calles, Brenda Lizeth Reyes García, Pedro Martín García Vite(2022). "Emulador solar fotovoltaico basado en el modelos implificado con interfaz inalámbrica". Coloquio de investigación multidisciplinaria journal CIM,10(1).

- María Andrea Olivo Calles, Diana Karen García Ventura, Brenda Lizeth Reyes García, Pedro Martín García Vite(2022). "Importancia de los emuladores solares fotovoltaicos en el Desarrollo de fuentes de generación solar". UMA-Reynosa2022.

Bibliografía

[1] J. W. Mercer Jr, C. Faust, and G. Pinder, "Geothermal reservoir simulation," US Geological Survey, Reston, VA; Princeton University, Princeton, New Jersey, Tech. Rep., 1974.

[2] H. Sarak, M. Onur, and A. Satman, "Lumped-parameter models for low-temperature geothermal fields and their application," *Geothermics*, vol. 34, no. 6, pp. 728–755, 2005.

[3] A. E. Ciriaco, S. J. Zarrouk, and G. Zakeri, "Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109515, 2020.

[4] O. de las Naciones Unidas. (2015) Objetivos de desarrollo sostenible: 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Naciones Unidas. [En línea; último acceso: 10-diciembre-2024]. [Online]. Available: https://sdgs.un.org/goals

[5] M. Soltani, F. Moradi Kashkooli, M. Souri, B. Rafiei, M. Jabarifar, K. Gharali, and J. S. Nathwani, "Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110750, 2021. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121000459

[6] Amexcid - catálogo de capacidades mexicanas de cooperación internacional para el desarrollo. [Online]. Available: https://de.sre.gob.mx/capacidades/

objetivos-de-desarrollo-sostenible/energ%C3%ADa-asequible-y-no-contaminante/secretaria-de-energia/inventario-nacional-de-energias-renovables-inere

[7] M. Chen, S. Ma, H. Wan, J. Wu, and Y. Jiang, "Distributed control strategy for dc microgrids of photovoltaic energy storage systems in off-grid operation," *Energies*, vol. 11, no. 10, 2018. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2637

[8] Petroquimex. Estado de la energía geotérmica en méxico. [Online]. Available: https://petroquimex.com/estado-de-la-energia-geotermica-en-mexico/

[9] R. V. Klyuev, I. D. Morgoev, A. D. Morgoeva, O. A. Gavrina, N. V. Martyushev, E. A. Efremenkov, and Q. Mengxu, "Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review," *Energies*, vol. 15, no. 23, p. 8919, 2022.

[10] Centro Nacional de Control de Energía. Programa para el desarrollo del sistema eléctrico nacional 2022-2036. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2022-2036

[11] Secretaría De Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Geotermia: fuente de energía renovable. [Online]. Available: https://www.gob.mx/semarnat/articulos/geotermia-fuente-de-energia-renovable

[12] R. M., *Geothermal Resources*. Springer Nature.

[13] G. Llopis and V. Angulo, "Guía de la energía geotérmica. fundación de la energía de la comunidad de madrid," 2012.

[14] A. F. H. OCHOA, "Modelación numérica de yacimientos geotérmicos con una aplicación en méxico."

[15] F. Posso, "Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas," *Geoenseñanza*, vol. 7, no. 1-2, pp. 54–73, 2002.

[16] G. Andraca and M. Rodríguez, "Modelado inicial para yacimientos geotérmicos durante la etapa de exploración," *Universidad Nacional Autónoma de México, México DF*, 2012.

[17] A. E. Ciriaco, S. J. Zarrouk, and G. Zakeri, "Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109515, 2020.

[18] C. Copol, J. Laminie, and S. Lopez, "Numerical modeling of geothermal systems," in *39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.

[19] J. W. Mercer Jr, C. Faust, and G. Pinder, "Geothermal reservoir simulation," US Geological Survey, Reston, VA; Princeton University, Princeton, New Jersey, Tech. Rep., 1974.

[20] L. G. Pérez, "Resiliencia de la geotermia en méxico para el aprovechamiento de yacimientos de media a baja entalpía: En méxico, la segunda energía con menos impacto al medio ambiente y de crecimiento es la energía geotérmica, pero debemos preguntarnos:¿ qué tecnología y políticas vamos se van a necesitar para impulsar su desarrollo?" *Energías Renovables*, vol. 7, no. 44, 2021.

[21] H. Sarak, M. Onur, and A. Satman, "Lumped-parameter models for low-temperature geothermal fields and their application," *Geothermics*, vol. 34, no. 6, pp. 728–755, 2005. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650505000817

[22] J. OSullivan, J. Popineau, M. Gravatt, T. Renaud, J. Riffault, A. Croucher, A. Yeh, and M. O'Sullivan, "An integrated, mesh-independent geothermal modelling framework," *Environmental Modelling and Software*, vol. 163, p. 105666, 2023. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481522300052X

[23] L. Zhang, A.-C. Dieudonné, A. Daniilidis, L. Dong, W. Cao, R. Thibaut, L. Tas, and T. Hermans, "Thermo-hydro-mechanical modeling of geothermal energy systems in deep mines: Uncertainty quantification and design optimization," *Applied Energy*, vol. 377, p. 124531, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924019147

[24] A. E. Ciriaco, S. J. Zarrouk, and G. Zakeri, "Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109515, 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307233

[25] M. Vasilyeva, M. Babaei, E. T. Chung, and D. Spiridonov, "Multiscale modeling of heat and mass transfer in fractured media for enhanced geothermal systems applications," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 67, pp. 159–178, 2019. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X18305171

[26] P. Tahmasebi and S. Kamrava, "A pore-scale mathematical modeling of fluid-particle interactions: Thermo-hydro-mechanical coupling," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 83, pp. 245–255, 2019. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583618305334

[27] E. Firanda, F. Pasaribu, Sutopo, and H. B. Pratama, "A modified non- isothermal lumped parameter model in porous media for geothermal reservoirs," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 732, no. 1, p. 012019, apr 2021. [Online]. Available: https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/732/1/012019

[28] P. Morrone and A. Algieri, "Integrated geothermal energy systems for small-scale combined heat and power production: Energy and economic investigation," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6639

[29] C. R. Faust and J. W. Mercer, "Geothermal reservoir simulation: 1. mathematical models for liquid-and vapor-dominated hydrothermal systems," *Water resources research*, vol. 15, no. 1, pp. 23–30, 1979.

[30] G. Montegrossi, B. Inversi, and D. Scrocca, "Reservoir modelling of deep geothermal systems: the examples of guardia lombardi," in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2013, pp. EGU2013–12 065.

[31] R. Abdel Azim, S. Alatefi, and A. Aljehani, "A fully coupled thermo-poroelastic model for energy extraction in naturally fractured geothermal reservoirs: sensitivity analysis and flow simulation," *Geothermal Energy*, vol. 12, no. 1, p. 26, 2024.

[32] R. M. Prol-Ledesma and D. J. Morán-Zenteno, "Heat flow and geothermal provinces in mexico," *Geothermics*, vol. 78, pp. 183–200, 2019.